

**INVESTIGACIÓN NUMÉRICA DE LA TERMODINÁMICA
DE EXTINCIÓN DE FUEGO MEDIANTE AGUA NEBULIZADA
EN UN CENTRO DE CÓMPUTO, EMPLEANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

ARTURO ARCE CASTILLO

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD LIBRE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
BOGOTÁ, D. C.
2016**

**INVESTIGACIÓN NUMÉRICA DE LA TERMODINÁMICA
DE EXTINCIÓN DE FUEGO MEDIANTE AGUA NEBULIZADA
EN UN CENTRO DE CÓMPUTO, EMPLEANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

Autor: ARTURO ARCE CASTILLO

Ingeniero Mecánico

**TESIS DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ENERGÍAS
ALTERNATIVAS**

Director: SALVADOR VARGAS DÍAZ

Doctor Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD LIBRE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN ENERGÍAS ALTERNATIVAS
BOGOTÁ, D. C.
2016**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C., Octubre de 2015.

Agradecimientos y dedicatorias

Absolutos y totales a Dios

INDICE

	Pág.
Resumen.....	8
Abstract	10
Glosario.....	12
Glosario de términos	14
INTRODUCCIÓN	17
<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	22
<i>1.1 Instalaciones físicas, ubicaciones y construcción de centros de cómputo</i>	22
<i>1.2 Inconvenientes de los sistemas de rociadores automáticos y sistemas especiales de extinción</i>	25
<i>1.2.1 Sistemas de rociadores automáticos.</i>	25
<i>1.2.2 Sistemas especiales de extinción</i>	28
<i>1.3 Objetivos</i>	29
<i>1.3.1 Objetivo General.</i>	29
<i>1.3.2 Objetivos Específicos.</i>	29
<i>CAPÍTULO 2</i>	31
<i>MARCO TEÓRICO</i>	31
<i>2.1 Mecanismos de extinción</i>	33
<i>2.2 Duración de la descarga.</i>	34
<i>2.3 Características de la pulverización</i>	35
<i>2.4 Métodos para generar agua nebulizada</i>	36
<i>2.4.1 Generalidades.</i>	36
<i>2.5 Dinámica computacional de fluidos aplicada a la extinción de incendios por medio de agua nebulizada</i>	39
<i>2.5.1 CFX</i>	40
<i>2.5.2 Resultados del ANSYS-CFX.</i>	43
<i>CAPÍTULO 3</i>	45
<i>IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA</i>	45

3.1 Estante o Rack de tecnología de la información.....	46
3.2 Dominio Computacional	49
3.3 Cálculo de la combustión y parámetros de incendio del centro de cómputo	51
3.3.1 Análisis combustión de material de aislamiento de cables poliimida.	51
3.3.2 Balanceo ecuación combustión.....	52
3.3.3 Masa de combustible evaporada.....	55
3.3.4 Tasa de liberación de calor.	57
3.3.5 Altura de llama.....	58
3.3.6 Temperatura de columna de humo.....	59
3.3.7 Fuente virtual del incendio.	61
3.3.8 Velocidad de la línea central del “penacho”.	62
3.3.9 Factor de decaimiento de velocidad entrada aire y temperatura.....	63
3.4 Condiciones iniciales y de frontera de simulación	64
3.5 Metodología para la simulación numérica ANSYS-CFX.....	69
3.6 Preprocesamiento	70
CAPÍTULO 4.....	75
ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
4.1 Posprocesamiento	79
4.1.1 Simulación para una presión de 203 psi.....	81
4.1.2 Simulación para una presión de 101 psi.....	89
4.1.3 Sistema de energía alternativa para alimentar la bomba del sistema de	94
agua nebulizada.	94
4.2 Comparación del modelo	96
Conclusiones	101
Recomendaciones y sugerencias	104
Referencias.....	106
Anexos	113
Anexo 1. “Contornos de temperatura para el volumen de control, simulación con presión de 203 psi”	114
Anexo 2. “Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi”	122

<i>Anexo 3. “Independencia de malla”</i>	133
<i>Anexo 4. “Dimensiones del volumen de control”</i>	138
<i>Anexo 5. “Boquilla de descarga”</i>	139
<i>Anexo 6. “Configuración de las simulaciones”</i>	140
<i>Anexo 7. “Evidencia Representante ANSYS Brasil”</i>	145

Resumen

El objetivo del presente proyecto de grado es la investigación de la extinción de fuego en centros de cómputo mediante agua nebulizada empleando un programa comercial de dinámica computacional de fluidos, se exhibe inicialmente el desarrollo de la investigación realizada por varios autores sobre el tema de agua nebulizada, luego se propone un modelo desde el cual se hace un análisis químico de la poliimida, que es la sustancia a modelar en condiciones de fuego y se plantean las ecuaciones que permiten determinar los principales residuos de las variables que intervienen en la combustión y extinción del incendio.

Con los resultados de los residuos de las variables del modelo propuesto; se procede a ingresar los datos al programa de dinámica computacional de fluidos ANSYS-CFX, el programa realiza las simulaciones de acuerdo con los parámetros previamente establecidos en el modelo. Los resultados muestran tiempos de extinción muy similares respecto a situaciones reales, en comparación con los resultados experimentales.

Como se mencionó, las aproximaciones a la realidad son muy similares, ya que se pudo evidenciar que por ejemplo; de acuerdo con las pruebas experimentales

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Realizadas, el programa muestra un comportamiento similar en la evolución del fuego, la extinción del mismo, los tiempos de extinción y descenso de temperaturas que las pruebas realizadas por estos autores.

Se realizaron una serie de simulaciones, dentro de las cuales se escogieron dos simulaciones; la primera simulación tenía una presión de descarga de 203 psi y la segunda simulación una presión de descarga de 101 psi, para la primera simulación se obtuvieron tiempos de extinción de 20 y 28 s y para la segunda simulación tiempos de extinción de 28 y 40s. Los tiempos de extinción determinados muestran que con una presión de descarga de 203 psi, es menor el tiempo de extinción que con una presión de 101 psi; por lo tanto la velocidad de descarga de agua es directamente proporcional al tiempo de extinción del fuego.

Abstract

The main objective of this master degree is to study the fire suppression in datacenters, applying water mist using a commercial program computational fluid dynamics program, initially exhibits the development of research developed by various authors on the subject of water mist then a model from which a chemical analysis of the polyimide, which is the substance modeling in fire conditions and equations to determining the main parameters involved in combustion and fire suppression.

With parameters obtained from the proposed model, proceed to enter the data to the computational fluid dynamics (ANSYS - CFX); the program performs simulations according previously established parameters in the model. The results show very good approximations regarding fires compared with experimental results, solid and liquid fires.

As mentioned, the approximations to reality are very similar, as it was evident that, for example, according to the experimental tests, the program displays the same behavior in the evolution of fire, termination, times extinction and decline in temperatures that conducted by these authors.

Several simulations were performed, the first simulation had a discharge pressure of 203 psi and the second simulation a discharge pressure of 101 psi, to the first simulation extinction times of 20 and 28 sec for the second simulation extinction times obtained

from 28 and 40s. Extinction certain times show a discharge pressure of 203 psi, is less than the decay time with a pressure of 101 psi; therefore the speed of water is directly proportional to the decay time of the fire.

Glosario

Agua Nebulizada. El término agua nebulizada se sugiere en los diferentes documentos para el tamaño de gota en el cual el noventa y nueve (99%) de volumen de gota es menor a mil micrones (1000 μm).

Incendio de Cubeta. Incendio que esta precedido por una fuga o derrame, el líquido se extiende, ocupando una superficie que depende de la existencia de cubeto u obstáculos que impidan su progresión.

Incendio de Piscina. Incendio que puede tener lugar inicialmente en el propio contenedor o depósito, pero en muchas ocasiones se produce la rotura del equipo produciendo la formación del charco.

Incendio Tipo A. Incendio de materiales combustibles comunes como madera, tela, papel, caucho y muchos plásticos.

Incendio Tipo B. Incendios de líquidos inflamables, líquidos combustibles, grasas de petróleo, breas, aceites, pinturas a base de aceite, disolventes, lacas, alcoholes y gases inflamables.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Incendio Tipo C. Incendios que involucran equipo eléctrico energizado, donde la resistividad eléctrica del medio de extinción es de importancia.

UPS. Fuente de alimentación ininterrumpida (UPS) por sus siglas en inglés (Under Pump System).

Paquete Combustible. Material o sustancia que puede sufrir combustión debido a una fuente de ignición.

Velocidad de la Línea Central del Penacho. Velocidad del aire por encima de la altura de la llama a través de la línea central de esta.

Factor de Decaimiento. Indicador de la celeridad con la cual magnitudes tales como la velocidad y la temperatura disminuyen gradualmente en la condición de frontera “entrada aire”.

Glosario de términos

Letras griegas

η : Eficiencia de la bomba.

ρ_o = Densidad del aire ambiente.

Letras latinas

A_p = área del incendio.

B_{hp} = potencia al freno.

C_p = Calor específico del aire.

D = Diámetro del incendio

D = Diámetro de la superficie del combustible en combustión.

g = Gravedad.

gpm = Galones por minuto.

H = Carga hidrostática neta

h_c = Calor de combustión neto del solido combustible.

K = Coeficiente de extinción – absorción.

B = Corrector de transferencia por longitud

kg = Kilogramo.

M = Masa evaporada por unidad de tiempo y área.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

m = Metros

mm = Milímetros

m_c = Masa evaporada del sólido de referencia.

Me = tasa de evaporación de combustible.

m_1 = Masa de CO_2 .

m_2 = Masa de H_2 .

m_3 = Masa de N_2 .

\dot{m} = Tasa de evaporación de combustible.

MPa = Mega Pascales

ρ = Densidad.

Q = Calor disipado por el fuego.

Q_c = Calor disipado por el fuego en forma convectiva

T_o = Temperatura ambiente absoluta.

T_∞ = Temperatura ambiente.

U_o = Velocidad media de la línea central.

Z = Altura por encima de la base del fuego.

Z_f = Altura promedio de la llama.

Z_o = Ubicación de la fuente virtual del incendio.

Acrónimos

ANSYS – CFX = Software de alto desempeño, programa de dinámica de fluidos de uso general que se ha aplicado para resolver ampliamente los problemas de flujo de fluidos por más de 20 años.

DCF = dinámica computacional de fluidos.

ANSYS - FLUENT = programa de simulación que contiene amplias capacidades de modelado físico.

FM-200 = nombre comercial que recibe el agente limpio de nombre químico heptafluoropropano.

HFC-125 = designación que recibe el agente limpio de nombre comercial ECARO 25.

hp = Horse power - caballos de potencia

NFPA = National Fire Protection Association - asociación nacional de protección contra incendio.

µm = micrones

INTRODUCCIÓN

El interés en cuanto al uso de agua nebulizada en los sistemas de supresión de incendios ha sido ampliamente aplicado en los últimos diez años. La fuerza económica tras este interés ha sido impulsada por dos grandes necesidades de la protección contra incendios. Primero, a inicios de los años 90, las organizaciones marítimas internacionales hacían obligatoria la instalación de sistemas de rociadores en las embarcaciones de pasajeros. Esto inspiró la búsqueda de un sistema que se pudiera considerar equivalente a los rociadores, pero que descargara una cantidad inferior de agua, utilizará tuberías de diámetro inferior y tuviera un peso inferior total al de un sistema de rociadores estándar y que fuera más económico. La segunda razón fue la necesidad de encontrar algo que reemplazara las sustancias de agotamiento de ozono tales como los halones, las cuales habían sido utilizadas durante décadas para proteger los espacios para maquinaria, cuartos con líquidos inflamables, cuartos de computadoras y cuartos para materiales sensibles al “daño ocasionado por el agua”.

El primer apartado sobre tecnología de agua nebulizada apareció hacia 1997 desde entonces, la tecnología ha avanzado de “potencial” a “real”. Existen sistemas instalados en los módulos de procesos en los campos de petróleo de Alaska, en hoteles, galerías de arte y cuartos de computadores de todo el mundo. La experiencia con el diseño, la instalación, la contratación y el mantenimiento de los sistemas ha avanzado constantemente.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

En el medio local siempre se ha tenido la percepción de que los elementos que funcionan en un centro de cómputo, de una u otra manera transportan electricidad al aplicarles agua cuando sufren un evento de incendio, estos eventos según se presume no pueden ser extinguidos o controlados con agua; ya que se piensa primero en que el agua conduce la electricidad y segundo que el daño ocasionado por el agua puede ser mayor que cualquier daño producido por el fuego.

El presente proyecto se enfoca en la investigación numérica termodinámica de la extinción de fuego en un centro de cómputo mediante agua nebulizada, empleando la dinámica computacional de fluidos; ya que para el tema en particular de los incendios en centros de cómputo se ha impuesto por parte de los propietarios un grado de restricción a que las eventualidades de incendio en el medio local solamente pueden ser controlados por agentes limpios, los códigos locales de construcción en cada país tal como la norma de sismo – resistencia 2010 en Colombia; actualmente no obligan a los propietarios a instalar un determinado sistema de extinción de incendios en los centros de cómputo; pueden instalar el que a bien del propietario más le convenga, sobre todo en términos económicos; aunque importantes entes internacionales tales como *Factory Mutual*, *International Maritime Organization* y *Underwriters laboratories* han apoyado el uso de agua nebulizada; la aceptación general por parte de los usuarios finales ha sido bastante lenta, adicional a los factores de índole ambiental y de salud generados por los agentes limpios, los sistemas de agua nebulizada también son propicios donde no hay o

existe la ausencia de un cuerpo apropiado de bomberos y la ausencia de un abastecimiento de agua lo suficientemente sólido. En el punto ambiental los agentes halogenados que actualmente se utilizan para realizar la extinción de incendios en centros de cómputo presentan serias preocupaciones ambientales, que involucran al gas heptafluoropropano y al gas pentafluororetano; ya que los dos agentes mencionados, que son los más usados actualmente para este tipo de ocupación, no solamente presentan implicaciones de daño a la capa de ozono y potencial de calentamiento global; también presentan riesgos para la salud; tal como efectos sobre el sistema nervioso y cardíaco en caso de exposición prolongada al gas. Se hace necesaria la instalación de sistemas de extinción que no presenten problemas de índole ambiental y sin efectos para la salud humana como los agentes mencionados.

El capítulo 1 trata el planteamiento del problema y los objetivos, se presenta la problemática de los incendios en centros de cómputo, cómo los incendios afectan los centros de cómputo, la dependencia de otros mercados de los centros de cómputo, se trata también los sistemas de protección contra incendio tanto de rociadores como sistemas especiales de extinción, se hace mención de los inconvenientes de los sistemas especiales de extinción, se realiza la comparación del gasto energético de una bomba de un sistema de rociadores y una bomba de un sistema de agua nebulizada, adicional se trata el tema del daño ambiental de los agentes limpios.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

El capítulo 2 trata el marco teórico, donde se exponen todos los principios tecnológicos de los sistemas de agua nebulizada que incluye: los mecanismos por los que se extingue el incendio, las características de la pulverización, los elementos de diseño y los medios por los cuales se puede generar agua nebulizada. También exhibe las ventajas del agua nebulizada, para finalmente abordar el tema de la dinámica computacional de fluidos aplicada a la extinción de incendios por medio de agua nebulizada.

El capítulo 3 explica la implementación de la simulación numérica, se presenta el rack (estante) de tecnología de información, también se expone el componente principal para aislar cables y alambres eléctricos que es la poliimida, sobre el cual se basa el análisis químico, luego se exhibe el dominio computacional, para a continuación realizar el cálculo de la combustión y los parámetros de incendio del centro de cómputo, finalmente se tratan las condiciones iniciales y de frontera de entrada de datos, la metodología para la simulación numérica y el preprocesamiento de datos.

El capítulo 4, muestra el análisis de los resultados de la investigación, se aborda el tema de la convergencia de las ecuaciones en los resultados, también el posprocesamiento que es donde se obtienen datos numéricos y gráficos de contornos, superficies, vectores y líneas de corriente. Así mismo se exponen los mecanismos de extinción por los cuales el agua nebulizada suprime un incendio y los criterios que se

tomaron para determinar dos de los tres parámetros de extinción de incendio. Se exponen las dos simulaciones realizadas y se explica cada una; para finalmente realizar una comparación del modelo con las pruebas experimentales realizadas por autores como *Huang (2011)*; es decir pruebas de incendios reales comparadas con las dos simulaciones realizadas.

Para finalizar el presente documento se dan las conclusiones y recomendaciones de la investigación, se presentan las referencias bibliográficas y los anexos, donde se expone un corte lateral en el centro del volumen de control y se puede apreciar la evolución del incendio en las simulaciones, la independencia de malla, esto para verificar que el mallado más denso produce resultados convergentes, en otro anexo se presentan las figuras donde se exhiben las dimensiones del volumen de control. Otro anexo trata las especificaciones de la boquilla de descarga, otro anexo presenta la configuración de las simulaciones y el último exhibe las evidencias de ANSYS Brasil.

En el presente documento se emplearon los dos sistemas de unidades; el sistema internacional y el sistema imperial.

CAPÍTULO 1

*PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**1.1 Instalaciones físicas, ubicaciones y construcción de centros de cómputo*

En los centros de cómputo aunque han venido disminuyendo los incendios, continúan presentándose; los incendios en cuartos de equipo electrónico se presentan en orden según la causa mayor de los equipos involucrados, se muestran los datos en la Tabla 1.

Ya que los equipos involucrados en los incendios son vitales para el funcionamiento del cuarto de cómputo, estos equipos no pueden ser evitados o eliminados de los centros de cómputo.

Los cables de energía y de comunicaciones, así como los enchufes y conectores deben estar listados y adecuadamente dimensionados; las aberturas de los pisos deben tener bordes alisados para evitar daños en los cables; los cables deben disponerse de modo que se eviten fallas múltiples serias debido al recalentamiento de un conducto, esto último podría desencadenar en un incendio debajo del piso falso de la sala de cómputo; los computadores muy grandes y algunos equipos electrónicos para el procesamiento de datos generan mucho calor y requieren que gran cantidad de aire pase a través del equipo para su enfriamiento, en caso de falla del sistema de aire acondicionado el calor proveniente del equipo de procesamiento de datos podría calentar una superficie o material combustible y llegar a generar un incendio.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Tabla 1. *Fuegos estructurales excluyendo casas, originados en cuartos de equipo electrónico como causa principal (Hall, 2001).*

Causa Principal	Incendios	Muertes		Daños Directos a la Propiedad (Millones de Dólares)
		Civiles	Heridos Civiles	
Equipo de distribución eléctrica	416	0	6	\$ 7,91
Otros equipos	283	0	6	\$ 11,92
Equipos , herramientas o aire acondicionado	72	0	0	\$ 0,77
Causa natural	42	0	0	\$ 1,59
Incendio intencional	41	0	0	\$ 3,66
Equipo de calentamiento	35	0	0	\$ 0,20
Llama abierta, soldadura o antorcha	16	0	0	\$ 0,17
Exposición (Otros fuegos)	13	0	0	\$ 1,37
Material de fumador	12	0	0	\$ 0,07
Equipo de cocina	9	0	0	\$ 0,04
Otras fuentes de calor	4	0	0	\$ 0,02
Niños jugando	1	0	0	\$ 0,00
Total	944	0	12	27,72

En la actualidad los centros de cómputo, presentan el inconveniente de requerir sistemas de detección y extinción de incendios, esto debido a los diferentes códigos locales de construcción o a requerimiento del mismo propietario del centro de cómputo; este requerimiento se hace con el fin de evitar los daños colaterales causados por un incendio tales como: la interrupción de procesamiento de datos, la pérdida de datos y la destrucción de los equipos de procesamiento de datos. Ya que es muy difícil reemplazar este equipo y su destrucción tiene impacto adverso sobre el propietario; su riesgo de daño o pérdida por incendio es casi que inaceptable.

Como los centros de cómputo son equipos costosos, susceptibles a daños y, con frecuencia, críticos para las operaciones, estos deben instalarse en áreas específicamente diseñadas para este propósito. Idealmente el centro de cómputo debe ubicarse en un edificio separado de un único piso, que sea resistente al fuego. Los centros de cómputo requieren seguridad, protección contra incendios y un ambiente controlado. Las ocupaciones auxiliares como las oficinas de programación y mantenimiento, las grandes impresoras, el suministro de papel, los registros y datos, deben estar separados del centro de cómputo por medio de particiones clasificadas contra incendio. Para proteger los equipos en las aberturas deben suministrarse puertas y contraventanas contra incendios listadas con una clasificación equivalente al riesgo que protege. También deben proporcionarse compuertas cortafuego listadas para proteger todas las penetraciones

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

necesarias de los conductos. El centro de cómputo no debe ubicarse encima, debajo o adyacente a áreas que alberguen procesos peligrosos; como por ejemplo donde se manejen líquidos inflamables.

1.2 Inconvenientes de los sistemas de rociadores automáticos y sistemas especiales de extinción

1.2.1 Sistemas de rociadores automáticos.

El agua en su estado natural contiene impurezas que la hacen conductiva. Si se aplica agua a incendios donde hay equipos eléctricos con corriente, se podría formar un circuito continuo que conduciría la electricidad a través del equipo. Cuando se instalan rociadores para proteger equipos electrónicos de cómputo, se debe desconectar la energía que llega al equipo antes de aplicar agua.

Un sistema de rociadores promedio según la norma NFPA 13 para un centro de cómputo, podría poseer una bomba centrífuga con las siguientes características: un motor tipo diésel que suministre 300 gpm a una presión aproximada de 100 psi; este consumiría de acuerdo con:

$$Bhp = \frac{\rho g Q H}{\eta} * 1,2660 \times 10^{-7} \quad (1)$$

dónde:

$Bhp = potencia\ al\ freno\ (hp)$

$\rho = Densidad\ (62,3\ \frac{lbm}{pie^3})$

$g = Gravedad\ (32,2\ \frac{pie}{s^2})$

$Q = Caudal\ (300\ galones\ por\ minuto\ gpm)$

$H = Carga\ hidrostática\ neta\ (230,67\ pies)$

$\eta = Eficiencia\ de\ la\ bomba\ (75\%)$

Entonces $Bhp = 23,29\ hp$

O también potencia de accionamiento si fuera un motor eléctrico (Pa) sería:

$$Pa = \frac{\rho g H Q}{\eta} \quad (2)$$

$\rho = Densidad\ (\frac{1000\ Kg}{m^3})$

$g = Gravedad\ (9,81\ \frac{m}{s^2})$

$Q = Caudal\ (0,019\ \frac{m^3}{s^2})$

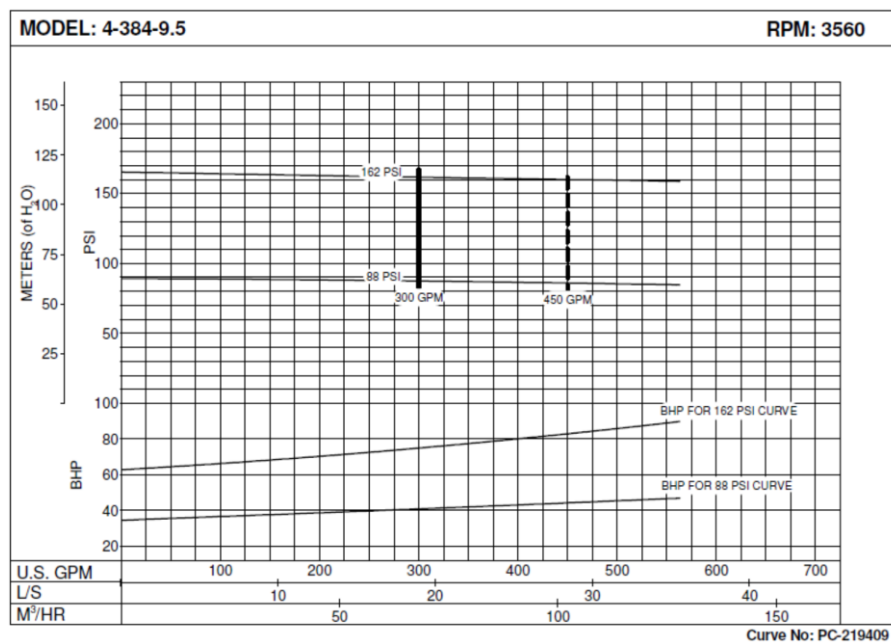
$H = Carga\ hidrostática\ neta\ (70,31\ m)$

$\eta = Eficiencia\ de\ la\ bomba\ (75\ \%)$

$Pa = 17,48\ Kilovatios\ ó\ 23,44\ hp.$

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Se toma como referencia la información suministrada por varios fabricantes de bombas contra incendio, entre ellos el reconocido fabricante de este tipo de bombas marca Aurora; en la que una bomba centrífuga tipo “end suction” con un caudal de operación de 300 gpm y un punto de operación de 100 psi, requeriría un motor mínimo de 30 hp. A continuación se anexa la curva de la bomba según el fabricante citado, Gráfica 1.



Gráfica 1. Curva de rendimiento bomba centrífuga con punto de operación de 300 gpm a 100 psi.

Fuente. Aurora Pumps.

Adicionalmente el tanque acumulador de agua para esta bomba sería de 13500 galones, aproximadamente 51 metros cúbicos, lo que requiere un espacio considerable para su instalación.

Un sistema de agua nebulizada según datos de fabricantes de sistemas de agua nebulizada como *Hi-fog*, *Fogtec* y *Spraying systems* operaría con una bomba de aproximadamente 5 hp y un tanque aproximado de 600 galones, aproximadamente 2,17 m³, por lo que el ahorro en gasto energético, económico y de espacio es importante.

1.2.2 Sistemas especiales de extinción

Los agentes limpios de supresión de incendios se definen como agentes extintores de incendios que se vaporizan rápidamente y no dejan residuos; la Tabla 2 es un resumen de los agentes de extinción de halocarbono y gas inerte más importantes desarrollados hasta la fecha.

Tabla 2. *Agentes de extinción de halocarbono y gas inerte. (NFPA, 2009 Volumen II Sección 9).*

Resumen de agentes de extinción y de gas inerte			
Nombre químico	Nombre comercial	Designación	Fórmula
Heptafluoropropano	FM-200	HFC-227ea	C ₃ F ₇ H

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Nombre químico	Nombre comercial	Designación	Fórmula
Pentafluororetano	FE-25 o ECARO 25	HFC-125	C ₂ HF ₅
1,1,1,2,2,4,5,5,5-nonafluoro-4-(trifluorometil) - 3-pentanona	NOVEC 1230	FK-5-1-12	CF ₃ CF ₂ C(O)CF(CF ₃) ₂
Nitrógeno / Argón / CO ₂	INERGEN	IG-541	N ₂ /Ar/CO ₂
Nitrógeno / Argón	ARGONITE	IG-55	N ₂ /Ar

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

Investigar numéricamente la termodinámica de la extinción del fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo empleando la dinámica computacional de fluidos.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar el tamaño de gota como una función de la presión de salida en la boquilla.

- Examinar el campo de temperaturas de las gotas de agua para la extinción del fuego.

- Verificar de acuerdo a la presión de salida la posibilidad de usar un sistema de energía alternativa para alimentar la bomba del sistema hidráulico para la extinción de fuego.

*CAPÍTULO 2**MARCO TEÓRICO*

Este proyecto se basó en la teoría de extinción de incendios por medio de agua nebulizada y en el programa de cómputo de dinámica computacional de fluidos (DCF) ANSYS - CFX.

Se trató en esta sección los principios generales de la tecnología de los sistemas de supresión de incendios con agua nebulizada e incluye los mecanismos de extinción, las características de pulverización, los elementos genéricos del diseño y los métodos para generar agua nebulizada.

El uso de agua nebulizada en la supresión de incendios, comparados a los agentes gaseosos y sistemas convencionales de rociadores, ha demostrado adelantos incluyendo los siguientes:

- El agua nebulizada no es tóxica y no presenta problemas de asfixia.
- No presenta problemas ambientales.
- El costo del sistema es bajo.
- Alta eficiencia en la supresión de ciertos fuegos.
- Tiene la ventaja de ser en ciertos países económica y abundante.
- Conveniente para varias clases de fuegos que pueden ser clase A, B, C.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

- Alta eficiencia: el consumo de agua es solamente entre el uno y cinco por ciento del tradicional hidrante contra incendios y la eficiencia del equipo tradicional de incendio de cien a doscientas veces.

- Enfriamiento del humo: el agua nebulizada se evapora inmediatamente cuando entra en contacto con el fuego, enfriamiento rápido, tasa de enfriamiento más rápida en cien veces que el sistema de rociadores tradicional, mejora la visibilidad, reduce las partículas de humo que hacen daño al cuerpo humano.

- Fácil de operar: con respecto al método de operación tradicional similar al hidrante contra incendios.

- Menos daño producido por el agua: evita el daño producido por exceso de agua y el daño ambiental secundario (daño de los equipos protegidos) y mantiene la evidencia del incendio; es decir no existen daños colaterales al equipo incendiado solo los del incendio permitiendo poder realizar posteriormente la investigación del incendio.

El agua nebulizada llena casi por completo los requisitos como agente extintor de incendios ideal. La tecnología del agua nebulizada es un desarrollo reciente en la protección contra incendios y promete suministrar todas las ventajas del agua con menos daños secundarios y respuesta mucho más rápida que los sistemas actuales. *-Zhigang, 2000-, -Yuh-Ming Ferng 2011-, -Chen Zu-ming 2011-.*

2.1 Mecanismos de extinción

La acción extintora de las pulverizaciones de agua, aplicada a los incendios que se encuentran comúnmente, parece que se debe predominantemente a la dilución del suministro de aire (oxígeno) en el área de la combustión, con el vapor de agua resultante de las gotas de agua, en el área calentada alrededor del incendio. En muchos casos, los efectos de enfriamiento del agua también pueden ser factores importantes en la extinción. Para obtener una extinción, las gotas de agua que conforman la pulverización deben ser relativamente pequeñas, por debajo de 1000 μm y la cantidad de agua aplicada debe ser suficiente según el incendio específico.

La Figura 1, ilustra los mecanismos involucrados en la extinción del fuego con agua nebulizada. Los mecanismos que actúan en conjunto para extinguir el fuego pueden ser descritos como tres mecanismos principales y dos secundarios. Los mecanismos principales son (1) la extracción de calor, (2) el desplazamiento de oxígeno y (3) el bloqueo de calor radiante.

Existen dos mecanismos secundarios que juegan un papel en la extinción, pero es difícil cuantificar su importancia. Estos son (1) la dilución de vapor/aire y (2) los efectos cinéticos. *NFPA 2009, Sección 8, Capítulo 15 p-237-268, -Zhigang, 2000-, -Huang X., 2011.*

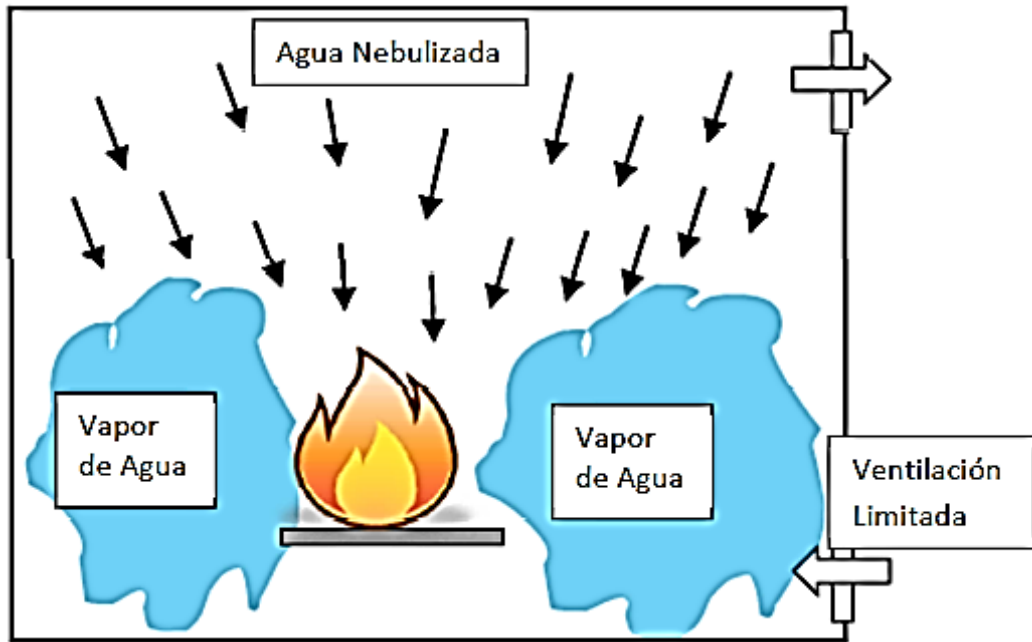


Figura 1. Mecanismo de extinción de fuego de agua nebulizada por desplazamiento de oxígeno y dilución de vapor.

Fuente. Modificada de SFPE Society of Fire Protection Engineers. (2012).

2.2 Duración de la descarga.

Existen razones para que un sistema proporcione agua por un periodo de tiempo más largo que el tiempo mínimo de extinción. Primero, los tiempos de extinción varían, incluso bajo condiciones controladas de prueba; y las condiciones en los compartimientos “reales” no pueden ser monitoreadas. Segundo, en el caso de los incendios de combustibles líquidos, es posible que ocurra una nueva ignición si las

superficies calientes no se han enfriado lo suficiente o si aún quedan llamas en un área protegida. En principio, el caudal se debe mantener hasta que se halla confirmado que todo el incendio ha sido extinguido y que no ocurrirá una nueva ignición. Dicha confirmación es difícil de obtener en las condiciones reales de incendio. Prácticamente, es tentador asignar una duración mínima arbitraria del caudal, basándose en suposiciones conservadoras acerca de la probabilidad de que el incendio se extinga. La NFPA 750 de los Estados Unidos, que es la norma sobre sistemas de protección contra incendios con agua nebulizada, recomienda que la reserva de agua tenga un tamaño basado en una duración mínima del caudal de 30 min.

2.3 Características de la pulverización

El término “agua nebulizada” implica una pulverización de agua muy fina que permanece suspendida en el aire durante un período de tiempo. El término expresa una de las cualidades de una pulverización, es decir, los tamaños de las gotas son “pequeños” en relación con la lluvia o con las pulverizaciones de los rociadores, por ejemplo. Esta característica del tamaño de la gota no es la única característica de una pulverización que debe controlarse con el fin de generar un medio efectivo de supresión del fuego. Existen otras tres características que tienen una influencia sobre su efectividad como agente extintor: (1) la densidad de la pulverización, la masa de agua suspendida

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

por unidad de volumen del espacio; (2) la velocidad con que ésta es descargada sobre el asentamiento del fuego; y (3) la calidad del agua en sí. (*NFPA 2009, Sección 8, Capítulo 15 p-237-268*). La cual puede contener aditivos disueltos para aumentar la efectividad de la supresión. Se enumeran las cuatro características del agua nebulizada para la supresión de incendios:

1. La distribución del tamaño de las gotas
2. La densidad del flujo
3. La impulsión del chorro
4. Los aditivos.

2.4 Métodos para generar agua nebulizada

2.4.1 Generalidades.

Los métodos para generar agua nebulizada varían de simples a elaborados. Alguno de los métodos más elaborados incluyen discos que giran a velocidades muy altas, vibraciones ultrasónicas, líquidos recalentados que se evaporan instantáneamente y se re condensan, y la liberación rápida de gases disueltos y explosivos.

Para los propósitos de la supresión del fuego, la selección del método se ve limitada por el hecho de que los caudales máxicos y las velocidades necesarias para que sea efectivo están más allá de la capacidad de algunos métodos.

Los métodos que son factibles para los sistemas de supresión de incendios son aquellos que descomponen el agua en gotas de tamaños inferiores a 1000 μm , a caudales máxicos y velocidades de pulverización apropiadas para los escenarios de incendio experimentales, los cuales pueden estar protegidos contra el taponamiento y que mantienen de un modo fiable dicho caudal durante todo el tiempo que se requiera. La economía al proporcionar energía almacenada o al instalar bombas y sistemas de tuberías especiales también es determinante en la selección de una tecnología que genere agua nebulizada para una aplicación determinada.

Actualmente, la tecnología de los sistemas de agua nebulizada se encuentra en un estado de innovación permanente. Esto es evidente particularmente en los conceptos para generar agua nebulizada que siguen emergiendo. Por lo general, los diseños de las boquillas de agua nebulizada involucran uno de tres principios básicos: (1) el choque de un chorro de agua sobre un deflector o impactación, (2) la expulsión de un chorro a alta velocidad desde un orificio, es decir un chorro a presión y (3) el uso de aire o nitrógeno comprimido para romper el agua en una pulverización muy fina que puede ser por medio de boquillas de fluido doble o atomizadores de aire. Los tres métodos han sido utilizados por los fabricantes de boquillas de pulverización por muchos años. Las innovaciones que están haciendo los fabricantes interesados en la supresión de incendios son para mejorar la eficiencia o para optimizar algunas características de la pulverización tales como el

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

caudal másico, la velocidad de la pulverización, el tamaño de las gotas o la geometría del cono. Algunos métodos nuevos que generan agua nebulizada funcionan sobre principios distintos o con combinaciones de los tres principios básicos.

La NFPA 750 hace una distinción entre los regímenes de presión a los cuales funcionan las tecnologías generadoras de agua nebulizada mediante la introducción de términos para sistemas de presión baja, intermedia y alta. Los sistemas de “baja presión” funcionan a presiones de 175 psi o menos; los sistemas de “presión intermedia” involucran presiones superiores a 175 psi, pero inferiores a 500 psi; y los sistemas de “alta” presión funcionan a presiones 500 psi o superiores. El rango de funcionamiento de los sistemas de baja presión es similar a los sistemas estándar de protección contra incendios, como los rociadores y tuberías verticales. Los requisitos para los tubos, accesorios, válvulas, bombas o cálculos hidráulicos se pueden cumplir a través de materiales y prácticas de instalación convencionales. Las tuberías, accesorios y válvulas para los sistemas de presión intermedia también se encuentran comúnmente, aunque puede que no existan bombas centrífugas contra incendio “listadas” que produzcan presiones en el rango de 500 psi. Por lo tanto, existen algunos aspectos de los sistemas de presión intermedia que están por fuera de la experiencia de la ingeniería de protección contra incendios estándar. Los requisitos especiales son necesarios para los sistemas de alta presión, para los tubos, accesorios, bombas, válvulas reguladoras de presión, cilindros y tanques. La tecnología de los sistemas de alta presión, aunque es nueva para

las prácticas de la ingeniería de protección contra incendios, está bien desarrollada en otras industrias, tales como la industria hidráulica y las industrias de perforación de petróleo en alta mar.

2.5 Dinámica computacional de fluidos aplicada a la extinción de incendios por medio de agua nebulizada

Con el reciente progreso en capacidad de los computadores se hace posible investigar el fenómeno relacionado con el fuego, especialmente por la interacción de fuego y agua nebulizada, esto por medio de la dinámica computacional de fluidos (DCF).

En la dinámica computacional de fluidos (DCF), se han enfocado varios estudios en la interacción del agua nebulizada con fuegos, haciendo diseños de sistemas de inundación total para parámetros de prueba y así evaluar el desempeño de diferentes tipos de boquilla. Se utilizó el programa de DCF ANSYS-FLUENT, un programa comercial con submodelos de elementos relativamente simples. Ya que el objetivo fue modelar el transporte y entrada de la nebulización dentro de la base del fuego, un simple incendio de piscina y gases calientes se presentó. La química de la combustión y los submodelos de radiación no son activados en estos estudios, ya que el costo computacional es alto, el modelo discreto de fase (DPM) por sus siglas en inglés (Discrete Phase Model) de DCF fue usado para simular el transporte y arrastre de la nebulización dentro de la base del fuego y el enfriamiento del fuego por la vaporización

del agua. Simulaciones adicionales se llevaron a cabo tratando la nebulización como un gas denso usando modelos de transporte especial. Finalizando con la aceptación de que un gas denso como el agua nebulizada es una sólida herramienta para la estimación del comportamiento del transporte de una partícula de momentum extremadamente bajo *Derrick (2009)*.

2.5.1 CFX

ANSYS-CFX, es un programa comercial de DCF, usado para simular el flujo de fluidos en una variedad de aplicaciones. El software está actualmente siendo desarrollado y comercializado por ANSYS Inc., pero fue inicialmente desarrollado desde CFX-4 -en Reino Unido -, y TASC flow, el cual fue creado por una avanzada empresa científica de Waterloo, Ontario, Canadá.

Ha sido utilizado como herramienta de evaluación, simulaciones de supresión de fuegos por medio de agua nebulizada, además de flujos físicos como convección y difusión del combustible y oxidante, además procesos físicos de inyección de partículas de agua nebulizada, interacción de la partícula – fluido y cambios de fase.

Una de las dificultades en usar ANSYS-CFX es que es una herramienta de propósito general de DCF y tiene un amplio rango de opciones de modelado. Los submodelos para simular correctamente la supresión de incendios mediante agua nebulizada, no están adecuadamente dimensionados y deben ser determinados.

El ajuste de la simulación es un problema de flujo multifase, con el flujo de aire y combustible como un fluido continuo y el agua nebulizada modelada como una fase continua, aglomerando partículas de cierto tamaño y distribución. ANSYS-CFX ofrece una opción entre un solucionador euleriano o lagrangiano.

La boquilla de agua nebulizada es modelada como un punto fuente con una inyección en forma de cono. El usuario puede especificar los parámetros de la boquilla tal como flujo másico, ángulo del cono y dirección de la inyección. El proceso de combustión puede ser modelado usando una reacción rápida sencilla, o una formulación más realística. Ya que las propiedades de cada proceso químico son seguidas separadamente cada una tiene su ecuación de transporte, la combustión debería ser también extinguida si hay un déficit de oxígeno.

Un gran número de opciones están disponibles para definir, la interface de interacciones euleriana - lagrangiana. Se puede especificar varios mecanismos de masa/ momentum/ transferencia de calor entre las dos fases, incluyendo el rompimiento aerodinámico de las partículas y la evaporación.

En ANSYS-CFX se llevó a cabo un estudio para determinar si el escenario de supresión de incendios de agua nebulizada podía ser simulado usando ANSYS-CFX 11.0. -*Derrick 2009*-. El escenario consistió en un fuego de metano dentro de un cuarto rectangular con rociadores de agua nebulizada en el techo, el cuarto mostrado en la Figura 2 tiene dimensiones de 12,5 m de largo por 8,4 m de ancho por 5,24 m de alto, con una entrada de incendio de un metro por un metro en la mitad del cuarto y una

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

puerta situada a un costado de dos metros por dos metros. Ocho rociadores se ubicaron en el techo con una disposición de dos ramales a lo largo del cuarto.

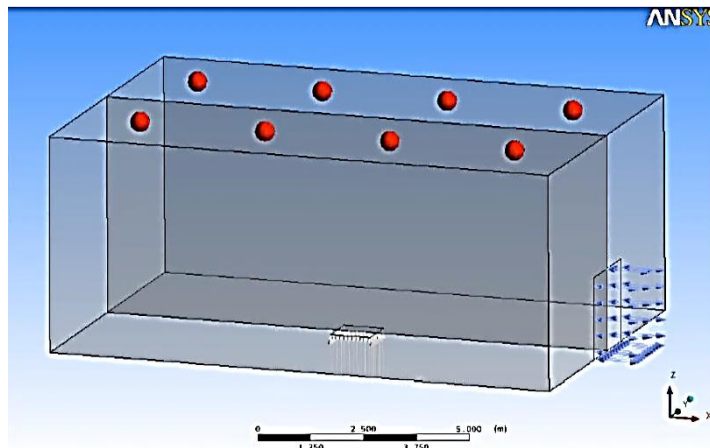


Figura 2. Escenario de incendio en ANSYS-CFX.

Fuente. *Derrick (2009)*

El cuarto fue llenado con 76,8% de Nitrógeno y 23,2% de Oxígeno a 300 K y 1 atmósfera para representar el aire ambiente. El gas metano (CH_4) a 300 K y una atmósfera fue inyectado dentro del cuarto a través de la entrada de combustible. Se asume que la combustión es completa, liberando dióxido de carbono y agua como productos y liberando calor dentro del cuarto, la puerta siempre estuvo abierta.

Derrick (2009) realizó una serie de modelos complejos para simular el problema de prueba. Los rociadores, se activaron 20 segundos después de iniciar el fuego. Los parámetros de estas simulaciones se encuentran tabulados en la Tabla 3.

Tabla 3. *Parámetros de simulación del CFX. Derrick (2009).*

Prueba No.	Tipo de simulación	Flotabilidad	Simetría	Modelo de turbulencia	Boquillas de agua nebulizada
1	Estado Estacionario	NO	Mitad	RANS k-e	Deshabilitadas
2	Transitorio	SI	Mitad	RANS k-e	Deshabilitadas
3	Transitorio	SI	Completa	DES	Deshabilitadas
4	Transitorio	SI	Mitad	RANS k-e	Habilitadas

2.5.2 Resultados del ANSYS-CFX.

Las simulaciones fueron realizadas en una estación de trabajo. Cada ejecución fue hecha de ocho modos y computada en paralelo en ocho núcleos.

La primera simulación en estado estacionario mostró que el chorro de metano fluye dentro del cuarto y arde mientras viaja a través del techo. Los productos

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

de la combustión se distribuyen a lo largo y ancho del techo. El contenido de oxígeno en el cuarto gradualmente tiende a cero; la simulación dos mostró los productos de la combustión en el techo. La simulación tres, ya que utilizaba un modelo de turbulencia sofisticado requería más costo computacional. Al final de la simulación el aire estaba siendo arrastrado a través de la puerta. Esto demuestra los efectos transitorios, la flotabilidad y los detalles de mezcla turbulenta, los resultados parecen ser físicamente correctos. La simulación cuatro que fue la simulación final, ya que tiene las boquillas activadas para simular la fina agua nebulizada obtuvo residuos de variables tales como: masa, momentum y transferencia de calor. Sin embargo la simulación no fue exitosa, no se pudo discernir si el agua nebulizada podía ser divisada en el dominio del flujo. Esto fue debido a la complejidad y falta de documentación y en los ajustes de la simulación multifase en ANSYS-CFX. Debido a las restricciones de tiempo, estos problemas no fueron resueltos. *-Derrick 2009-*.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La implementación de sistemas de agua nebulizada no es un gran obstáculo a nivel económico; ya que los sistemas de rociadores permitidos y exigidos actualmente por los diferentes códigos como por ejemplo el código colombiano de sismo resistencia NSR-2010, poseen el problema de costos elevadísimos y el factor más importante que es el de requerir un gasto muy superior de agua y energía para extinguir los incendios respecto a los sistemas de agua nebulizada, consumo de agua menor hasta en un 90% de los sistemas de agua nebulizada respecto a los sistemas de rociadores tradicionales; esto debido a que los sistemas de rociadores requieren más energía para accionar las bombas hidráulicas y las densidades de aplicación de agua son mucho mayores con la utilización de sistemas de rociadores que con la utilización de sistemas de agua nebulizada. Las bombas comercialmente existentes en el mercado certificadas en servicio contra incendio para sistemas de rociadores tienen capacidades que van desde 25 gpm hasta 5000 gpm; las bombas con puntos de operación de 500 gpm, poseen motores tipo diesel que están en el rango de entre 30 hp y 50 hp, dependiendo de la presión de operación, mientras que las bombas que accionan sistemas de agua nebulizada poseen motores que se encuentran en el rango de entre 3 hp y 5 hp dependiendo también de la presión de operación. Ante los bajos niveles de potencia por debajo de 5 hp requeridos por los sistemas de agua nebulizada respecto a los sistemas de rociadores convencionales en

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

centros de cómputo; se da la posibilidad de que las bombas de los sistemas de agua nebulizada sean alimentadas por fuentes de energías renovables, los paneles solares o microturbinas pueden suministrar la potencia a bombas que están entre los rangos de 3 hp a 5 hp; esto permitirá en las instalaciones de centros de cómputo, la instalación de sistemas de agua nebulizada con un importante ahorro de energía respecto a los centros de cómputo que poseen sistemas de rociadores, haciendo de los sistemas de agua nebulizada una forma de energía alternativa respecto a los sistemas de rociadores y aportando ambientalmente respecto a los sistemas de agentes halogenados.

Adicional a lo anterior el daño colateral generado por un sistema de rociadores en caso de descargarse, puede ser mucho mayor que el daño del mismo incendio. Se tiene de un lado el efecto ambiental y de costo causado por los agentes halogenados y de otro lado el costo y el gasto energético y de agua de los sistemas de rociadores, estas controversias respecto a los rociadores y a los sistemas de agentes limpios, pueden ser resueltas con la implementación de sistemas de agua nebulizada.

3.1 Estante o Rack de tecnología de la información

En el diseño del modelo se instaló un rack de tecnología de la información; este tiene dimensiones de 2,20 m de alto, 1,0 m de profundidad y 0,60 m de ancho.

Se tomó como referencia el estante (rack) de tecnología de la información de la marca axis con referencia AXGP-7F100NM de 147 kg de peso. La Figura 3 ilustra el tipo estante (rack) utilizado.



Figura 3. Típico estante utilizado en centro de cómputo.

Fuente. <http://www.axis-co.com/Gabinetedepisoservidores.pdf>.

El estante mostrado es uno de los comercialmente más utilizados en el mercado local de centros de cómputo. Dentro de estos estantes se encuentran equipos tales como discos magnéticos, papel, equipos enrutadores y cableado entrante y saliente entre otros.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Ya que el cableado es la parte que tiene más facilidad de ignición y es por la que se presentan más incendios, ver Tabla 1, por lo tanto sobre el cableado se realizó el análisis del fuego.

El material utilizado para aislar los cables y los alambres eléctricos es un compuesto fabricado de poliamidas; dentro de esta poliamidas se pueden distinguir dos tipos: las imidas poliamidas y las poliimidas, estos dos últimos compuestos son usados generalmente para todo lo que tiene que ver con aislamiento de cables y alambres.

En una molécula, una imida es un grupo que tiene una estructura general (dibujada en azul) mostrada a continuación en la Figura 4.



Figura 4. Estructura de una imida.

Fuente. Bust, G. *Las poliimidas*.

Es decir que si la molécula mostrada arriba polimerizara, el producto sería, una poliimida. Las poliimidas adoptan generalmente dos formas. La primera es una estructura lineal donde los átomos del grupo imida forman parte de la cadena lineal. La

segunda es una estructura heterocíclica donde el grupo imida forma parte de una unidad cíclica en la cadena polimérica.

Las poliimidas heterocíclicas aromáticas, son típicas de la mayoría de las poliimidas comerciales. Estos polímeros tienen características mecánicas y térmicas elevadas. Son utilizados en lugar de los metales y el vidrio en muchas aplicaciones de alto desempeño, ya sea en electrónica, en automotores e incluso en las industrias aeroespaciales. Aunque las poliimidas son difíciles de incendiarse esto no quiere decir que bajo ciertas condiciones estas no produzcan un incendio de proporciones importantes.

3.2 Dominio Computacional

Se tomó como volumen de control el volumen finito donde está ubicado el estante mostrado en la Figura 3. Este volumen finito de control tiene dimensiones de 2 m de largo, 2 m de ancho y 0,850 m de altura; se tomó este volumen ya que la descarga de la boquilla es de 60° y al realizar las simulaciones se observó que la dimensión superior no interactúa con la simulación, así el volumen finito es bastante conservador. Ya que el estante se ubica dentro del volumen finito; para efectos del análisis no se toma el volumen completo del estante (rack) del centro de cómputo; solamente se toman las dimensiones de 1 m de profundidad y 0,60 m de ancho; la altura solamente se tomó de 0,5 m, ver anexo cuatro, la única dimensión de la que se omite parte de su medida es la

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

altura del estante, ya que de altura se tomó 0,5 m y el estante mide 2,20 m de alto; esta medida inclusive se hubiera podido disminuir más, ya que la única parte en que se toma la combustión es en la superficie, ya que el fuego únicamente se presenta es en esta zona. Dentro de este volumen finito de control se ubicó una boquilla de agua nebulizada ubicada justo sobre el paquete combustible; es decir sobre el estante del centro de cómputo. A continuación se ilustra una imagen del volumen finito, Figura 5.

En la Figura 5 se puede apreciar el volumen finito considerado y dentro de este volumen la parte superior del rack del centro de cómputo; sobre la superficie superior se ubicó la boquilla, que aparece como un punto. En el anexo cuatro se muestran las dimensiones del volumen de control.

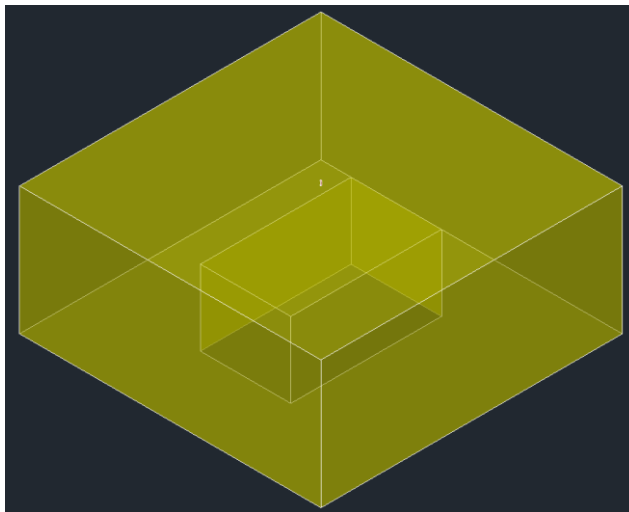


Figura 5. Escenario de incendio.

Para el proyecto se desarrolló una metodología de un modelo de dinámica computacional de fluidos; plantea un incendio en un centro de cómputo con dimensiones y carga combustible conocida (poliimida); así como también con un parámetro crítico conocido como es la altura desde donde se descargó el agua a través de boquillas; a continuación se relaciona el modelo físico – químico donde se obtuvieron otros datos críticos tales como la tasa de liberación de calor y la velocidad del aire en el penacho de fuego.

3.3 Cálculo de la combustión y parámetros de incendio del centro de cómputo

3.3.1 Análisis combustión de material de aislamiento de cables poliimida.

A continuación se relaciona las restricciones del modelo utilizado para realizar el análisis del material del cableado del centro de cómputo denominado poliimida:

- El análisis se limita a un proceso con combustión completa.

- Se restringe solamente para aislamiento de cables, fabricados en poliimida cuya composición es:

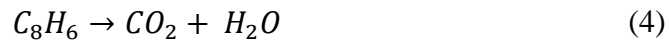


Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

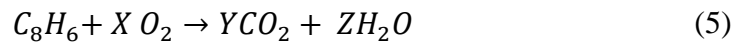
- La velocidad de la línea central del “penacho”, se toma a elevación por encima de la altura de la llama y se toma en la línea central del penacho, no se considera que al alejarse del centro del penacho la velocidad disminuye. Esto hace el cálculo más conservador.

- El paquete combustible se encuentra justamente por debajo de la boquilla.

3.3.2 Balanceo ecuación combustión.



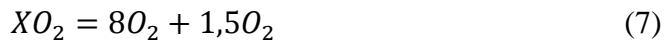
Ahora ubicando los coeficientes, se obtiene la Ecuación 5:



Donde X, Y y Z al realizar la estequiometria se tienen los siguientes valores:

$$Y = 8 \text{ y } Z = 3$$

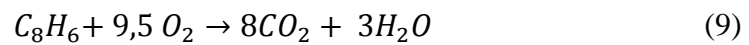
Realizando el balance de oxígeno, según las ecuaciones 6, 7 y 8



$$XO_2 = 9,5O_2 \quad (8)$$

$$X = 9,5$$

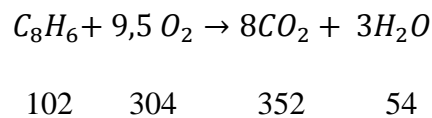
Por lo tanto, la ecuación de combustión para la poliimida queda expresada a través de la Ecuación 9:



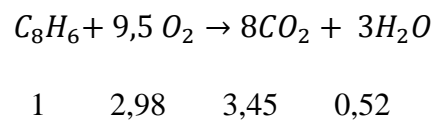
Teniendo en cuenta el peso molecular de los componentes:

C = 12;	O ₂ = 32;	H = 1
H ₂ O = 18	CO ₂ = 44	O = 16.

Se tiene que el análisis por peso de la ecuación 9 es



Dividiendo los pesos de los componentes de entrada y salida en la reacción de combustión que es la ecuación 9 por el peso de la poliimida (102) se tiene:



Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Lo cual significa que por cada kilogramo de recubrimiento de cable (poliimida) se requiere 2,98 kg de oxígeno (O₂) liberando 3,45 kg de dióxido de carbono (CO₂) y 0,52 Kg de agua con una combustión completa.

Para la determinación de la cantidad teórica de aire necesario para la combustión, se toma en cuenta que este tiene una composición aproximada en peso de 21 % de oxígeno (O₂) y 79 % de nitrógeno (N₂). Para el efecto se han despreciado otros componentes como vapor de agua y otros gases que se encuentran en menor proporción.

En la reacción de combustión aparece como componente de entrada y salida la fracción de nitrógeno.

La cantidad de aire entonces se determina dividiendo el peso del oxígeno de entrada 2,98 kg de oxígeno entre el porcentaje de composición del oxígeno en el aire expresado como decimal, obteniendo:

$$\frac{2,98}{0,21} = 14,19 \text{ kg de aire}$$

Esto quiere decir que por cada kilogramo de recubrimiento de cable (poliimida) se requiere 14,19 kg de aire, produciendo 15,19 kg de gases de combustión, ecuación 10



$$1 \text{ kg} + 14,19 \text{ kg} \rightarrow 15,19 \text{ kg}$$

3.3.3 Masa de combustible evaporada.

Para el cálculo de la masa de combustible evaporada (M) del sólido; se tomó el incendio de piscina, la masa de combustible evaporada se calculó mediante la ecuación 11. (NFPA 92, 2012)

$$M = m_c (1 - e^{-KB*D}) \quad (11)$$

dónde:

M: masa evaporada por unidad de tiempo y área (lbm / pie² s).

m_c : masa evaporada para el sólido de referencia (lbm / pie² s).

KB: factor o variable (pie⁻¹).

D: diámetro de fuego (pie).

Los factores m_c y KB ante la ausencia de datos; el valor de KB será tomado para la poliimida con el del polimetilmetacrilato, ya que la relación oxígeno / combustible en peso es prácticamente igual para la poliimida, este valor es de 13,00 para la poliimida y para el polimetilmetacrilato es de 12,67, el valor de m_c será el del estireno que sigue el mismo comportamiento de combustión de la poliimida.

$$m_c = 0,007 \frac{lbm}{pie^2} s$$

$$KB = 1,0 \text{ pie}^{-1}$$

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

El diámetro de fuego se calcula de acuerdo a las dimensiones del sólido en combustión; en este caso se tomará de acuerdo a la parte superior del rack que tiene unas dimensiones de 0,60 m por 1 m; por lo tanto el área de incendio será de 0,6 m². Se asume que esta zona está totalmente llena de cable sin espacios entre los mismos.

Para paquetes no circulares de incendio como en este caso, puede estimarse un diámetro efectivo (D) dado por la ecuación 12:

$$D = 2 \left(\frac{Af}{\pi} \right) \quad (12)$$

dónde:

Af = área del incendio (m²).

π = 3,1416

D = Diámetro efectivo (m)

D = 0,87 m = 2,87 pies.

Ahora reemplazando valores para la masa de combustible evaporada:

$$M = 0,0029 \frac{kg}{m^2} s$$

Teniendo en cuenta un área de incendio de 0,6 m² se tiene que la tasa de evaporación de combustible (\dot{m}) es igual a:

$$\dot{m} = M * Ap \quad (13)$$

dónde:

\dot{m} = tasa de evaporación de combustible $\left(\frac{kg}{s}\right)$

M = masa evaporada para el sólido en referencia $\left(\frac{kg}{m^2s}\right)$

Ap = área del incendio (m²).

$$\dot{m} = 0,00017 \frac{kg}{s}$$

3.3.4 Tasa de liberación de calor.

Para la determinación de la tasa de liberación de calor de la combustión (Q), se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m} * hc \quad (14)$$

dónde:

Q = tasa de calor liberado (kW)

hc = Calor de combustión neto del sólido combustible $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$, que para la poliimida tiene un valor de 38700 kJ/kg.

\dot{m} = tasa de evaporación de combustible.

$$Q = 6,46 \text{ kW o } 22042,94 \text{ Btu/h.}$$

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

El calor producido por el sólido en combustión, es transmitido al medio ambiente en forma convectiva y radiante, generalmente la fracción convectiva (Q_c) se considera el 70%; siendo la fracción radiante el 30%. (NFPA 92, 2012), NFPA. (2009). *Manual de protección contra incendios. Quinta edición en español. Volumen I. Sección 1. Cap. 3*

Se tiene la Ecuación 15:

$$Q_c = 0,7 * Q \quad (15)$$

$$Q_c = 4,52 \text{ kW}$$

3.3.5 Altura de llama.

Para el cálculo de la altura de llama se considera un modelo de incendio rectangular, en el cual el combustible arde, limitado por la superficie rectangular del rack del centro de cómputo, no permitiendo extenderse hacia otras áreas. Se puede obtener un cálculo razonable de la altura de la llama en un paquete sin paredes cercanas con la Ecuación 16:

$$Z_f = 0,166 \left(\frac{Q}{k}\right)^{0,4} \quad (16)$$

dónde:

Z_f = altura promedio de la llama (m)

Q = liberación de calor del incendio (kW)

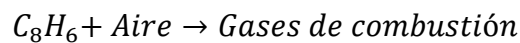
k = factor de pared (para este caso tiene un valor de 1 ya que no hay paredes cercanas.

Reemplazando valores en la ecuación se tiene que:

$$Z_f = 0,35 \text{ m}$$

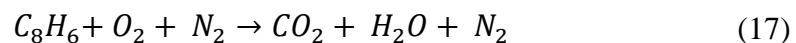
3.3.6 Temperatura de columna de humo.

Para el cálculo de la temperatura absoluta en la línea central de la columna de humo (T_∞) se considera que esta tiene el mismo comportamiento de una columna de aire caliente; se toma una temperatura de $415 \text{ }^\circ\text{C} = 688 \text{ K}$, que es la temperatura a la que arde el paquete combustible para la columna de humo; por estequiometria se tiene la Ecuación 10:



$$1 \text{ kg} + 14,19 \text{ kg} \rightarrow 15,19 \text{ kg}$$

Ahora relacionando también el nitrógeno, se tiene la ecuación 17



$$1 \text{ kg} \quad 2,98 \text{ kg} \quad 11,21 \text{ kg} \rightarrow 3,45 \text{ kg} \quad 0,52 \text{ kg} \quad 11,21 \text{ kg}$$

De la Ecuación 10, se toma una masa de 15,19 kg. Se halla la densidad media de la columna de humo a través de la Ecuación 18.

$$\rho_{Media} = \frac{(m_1 \rho_{CO_2}) + (m_2 \rho_{H_2O}) + (m_3 \rho_{N_2})}{m} \quad (18)$$

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

dónde:

$$m_1 = \text{masa de } CO_2 \text{ (kg)} \quad \rho_{CO_2} = \text{Densidad de } CO_2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$m_2 = \text{masa de } H_2O \text{ (kg)} \quad \rho_{H_2O} = \text{Densidad de } H_2O \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$m_3 = \text{masa de } N_2 \text{ (kg)} \quad \rho_{N_2} = \text{Densidad de } N_2 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

m = masa total gases de combustión (kg)

$$\rho_{Media} = 0,552 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Esta densidad media, es la densidad para la cortina de humo de gases de combustión a temperatura de (688 K) y la densidad del aire a 688 K es $\rho_{aire} = 0,5126$ (kg/m³).

Ya que las densidades son muy parecidas en valor, se concluye que la columna de humo tiene el mismo comportamiento que una cortina de aire caliente; por ende se utilizan las propiedades termodinámicas del aire. Para calcular la temperatura de la columna de humo se obtiene a través de la Ecuación 19:

$$T_{\infty} = T_o + 9,1 \left[\frac{T_o}{g * Cp^2 * \rho o^2} \right]^{\frac{1}{3}} * \left[\frac{Q^{\frac{2}{3}}}{Z^{\frac{5}{3}}} \right] \quad (19)$$

dónde:

T_{∞} = temperatura absoluta en la línea central de la columna de humo (K)

T_o = temperatura ambiente absoluta (K)

g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

C_p = calor específico del aire $\left(1 \frac{kJ}{kg K}\right)$

ρ_o = densidad del aire ambiente $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Q = calor disipado por el fuego en forma convectiva (kW)

Z = altura encima de la base del fuego (m)

Reemplazando valores:

$$T_{\infty} = 687,8 K \text{ ó } 415 \text{ }^{\circ}C$$

3.3.7 Fuente virtual del incendio.

Con el fin de estimar la temperatura y la velocidad media de la línea central del penacho, se debe determinar primero el origen virtual. El origen virtual es la ubicación o la elevación hipotética asociada con una sustitución de un incendio con fuente puntual de calor, para el incendio real en cuestión; se tiene la Ecuación 20:

$$Z_o = -1,2D + 0,083 Q^{\frac{2}{5}} \quad (20)$$

dónde:

Z_o = ubicación de la fuente virtual del incendio (m)

D = diámetro de la superficie del combustible en combustión (m)

Q = Calor disipado por el fuego (kW)

Reemplazando valores se tiene:

$$Z_o = -0,72 \text{ m}$$

3.3.8 Velocidad de la línea central del “penacho”.

La velocidad en la línea central del penacho a elevaciones por encima de la altura media de la llama puede estimarse a partir de la Ecuación 21

$$U_o = 3.4 \left[\frac{g}{Cp * \rho_{\infty} * T_{\infty}} \right]^{\frac{1}{3}} * Qc^{\frac{1}{3}} * [Z - Z_o]^{-\frac{1}{3}} \quad (21)$$

dónde:

U_o = velocidad media de la línea central (m/s)

g = aceleración de la gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

Cp = calor específico del aire $\left(1 \frac{kJ}{Kg} K\right)$

ρ_{∞} = densidad del aire ambiente $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

T_{∞} = temperatura ambiente (K)

Q_c = Calor disipado por el fuego en forma convectiva (kW)

Z = elevación por encima de la fuente del incendio del combustible que se quema (m).

Z_o = ubicación de la fuente virtual del incendio (m).

Reemplazando valores se tiene:

$$U_o = 1,67 \frac{m}{s}$$

3.3.9 Factor de decaimiento de velocidad entrada aire y temperatura.

Se tiene que la boquilla de descarga según la hoja técnica del fabricante (ver anexo) a 14 bares que equivale a 203,05 psi; produce aproximadamente 0,000125 m³/s lo que equivale a 1,9813 gpm, se tiene que a una distancia de la boquilla de 37 centímetros respecto a la parte superior del rack y con un ángulo de 60°, la cobertura de la boquilla a esta distancia sería de 0,42 m, este diámetro de cobertura daría según la Ecuación 22, un área de:

$$A = \pi * (r)^2 \tag{22}$$

$$A = 0,14 \text{ m}^2 \text{ ó } 1,49 \text{ pie}^2$$

Teniendo entonces un caudal de descarga de 1,98 gpm se tiene:

$$\frac{1,98 \text{ gpm}}{1,49 \text{ pie}^2}$$

Esto da un resultado de una densidad de descarga de 1,33 gpm/pie², y con un factor de decaimiento para 0,1gpm / pie² de 0,0023; se tiene según la Tabla 4:

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Tabla 4. *Factor de decaimiento.*

$\frac{gpm}{pie^2}$	K (factor de decaimiento)
0,1	0,0023
1,33	X

Esto da un factor de decaimiento para la boquilla a la distancia de 37 centímetros de 0,031.

3.4 Condiciones iniciales y de frontera de simulación

El programa de dinámica computacional de fluidos ANSYS-CFX para realizar las simulaciones de la extinción de incendio mediante agua nebulizada; requiere una serie de entrada de datos para unas variables previamente determinadas en la sección 3.3, las cuales fueron obtenidas en “cálculo de la combustión y parámetros de incendio del centro de cómputo”; estas variables manejan unas ecuaciones de entrada para que el software realice el cálculo del residuo de las variables.

Cualquier flujo en mecánica de fluidos es determinado por la ecuación más importante y que rige la mecánica de fluidos; que es la ecuación de Navier-Stokes, Ecuación 23:

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (23)$$

Se enuncian las ecuaciones promedio de Reynolds de Navier–Stokes (RANS) la ecuación 24 expone la velocidad U_i que puede ser dividida en un componente promedio, \overline{U}_i y un componente de variación del tiempo, u_i .

$$U_i = \overline{U}_i + u_i \quad (24)$$

$$\overline{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt \quad (25)$$

El componente promedio está dado por la ecuación 25 donde Δt es una escala de tiempo que es relativamente grande a las fluctuaciones de la turbulencia. Las ecuaciones 26 y 27 son las ecuaciones de transporte

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M \quad (27)$$

Donde τ es el esfuerzo tensor molecular (incluyendo los componentes de esfuerzo normal y de cizallamiento

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Así mismo el programa requiere las ecuaciones instantáneas de masa, momentum y conservación de la energía; las ecuaciones instantáneas para flujos turbulentos son promediadas dando lugar a términos adicionales; las ecuaciones instantáneas de masa, momentum, conservación de la energía y otras importantes ecuaciones solucionadas por el software pueden ser escritas tal como sigue:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (28)$$

Ecuaciones de momentum:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (29)$$

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot u \right) \quad (30)$$

El esfuerzo tensor τ está relacionado con la velocidad de deformación.

Ecuación de energía térmica:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) = -U \cdot \nabla \rho + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M \quad (31)$$

Modelo de turbulencia k- épsilon (Ecuación de continuidad)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (32)$$

Modelo de turbulencia k-épsilon (Ecuación de momentum)

$$\frac{\partial \rho U_I}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_I} (\rho U_I U_I) = -\frac{\partial p'}{\partial x_I} + \frac{\partial}{\partial x_I} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_I}{\partial x_I} + \frac{\partial U_I}{\partial x_I} \right) \right] + S_M \quad (33)$$

Presión Total - Flujo multifase:

$$P_{tot} = P_{stat} + \sum_a \frac{1}{2} r_a P_a U_a^2 \quad (34)$$

Las ecuaciones número 28 hasta la 34 son las principales ecuaciones que trabaja el programa en la simulación de flujos multifase. Los modelos de turbulencia son tomados por defecto del programa y para el proyecto se tomó el modelo k-épsilon, que se ajusta más a los flujos multifase, ya que se intentó cambiar a otros modelos y las simulaciones siempre presentaban falla. Esto ya que el programa de modelamiento sugería para flujos multifase este tipo de modelos. *ANSYS (2011)*; en la Tabla 5 se dan

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

las convenciones de esta ecuaciones, se hace énfasis que solamente se exponen las principales ecuaciones, más no todas las operadas por el programa en un flujo multifase.

Tabla 5. Convenciones de ecuaciones operadas por el CFX en simulaciones multiflujo.

Ansys (2011)

Convenciones de ecuaciones	
Símbolo	Descripción
ρ	Densidad
U	Vector de velocidad
∇	Operador vector
S_M	Fuente u origen de momentum
δ	Matriz de identidad
K	Energía mecánica
r_a	Fracción de volumen
ρ_a	Densidad del material
$r_a \rho_a$	Densidad de la mezcla

Una simulación multiflujo se presenta cuando más de un fluido está presente. Cada fluido posee su propio campo de flujo o todos los fluidos podrían poseer un mismo campo de flujo, en este caso se presentan fluidos donde cada uno tiene su propio campo de flujo. Con los datos requeridos por el programa, ya calculados en la sección 3.3; se plantea la metodología para realizar la simulación numérica.

3.5 Metodología para la simulación numérica ANSYS-CFX

Inicialmente se generó la geometría, para luego darle atributos de malla, con la malla generada de tipo triangular, se procede a exportar el archivo a ANSYS-CFX para así dar valores numéricos a las propiedades del fluido y a las condiciones de frontera, realizado lo anterior se procede a dar inicio a la simulación, para luego obtener en el posprocesador las gráficas y resultados que permiten el análisis cualitativo y cuantitativo del proyecto.

1. Preprocesador:

- a. Geometría: dominio computacional
- b. Generación de malla
- c. Modelo físico
- d. Definición de propiedades del fluido
- e. Condiciones iniciales y de frontera.

2. Solucionador

- a. Algoritmo o esquema numérico
- b. Integración de las ecuaciones
- c. Discretización de las ecuaciones
- d. Solución algebraica.

3. Posprocesador

- a. Gráfica de vectores
- b. Gráfica de contornos
- c. Gráfica de superficies.

3.6 Preprocesamiento

Dentro de la metodología para realizar la simulación numérica, se encuentra la parte de preprocesamiento, que es donde se genera la geometría en la que se va a realizar la simulación. El dominio computacional se generó para la parte superior de un estante de tecnología de la información centro de cómputo ver Figura 3; con la geometría del dominio computacional creada se procede a realizar la generación de la malla, se trabajó con una malla de 20 mm; Se pretendió trabajar con mallas de 10 y 15 mm pero al trabajar estas mallas más densas; la capacidad computacional empezaba a mostrar signos

de exceso de datos en la memoria RAM y la computadora se bloqueaba, el anexo tres muestra la elaboración de la independencia de malla, la cual diagnostica el por qué se trabajó con la malla más densa. La Figura 6 exhibe el dominio computacional mallado.

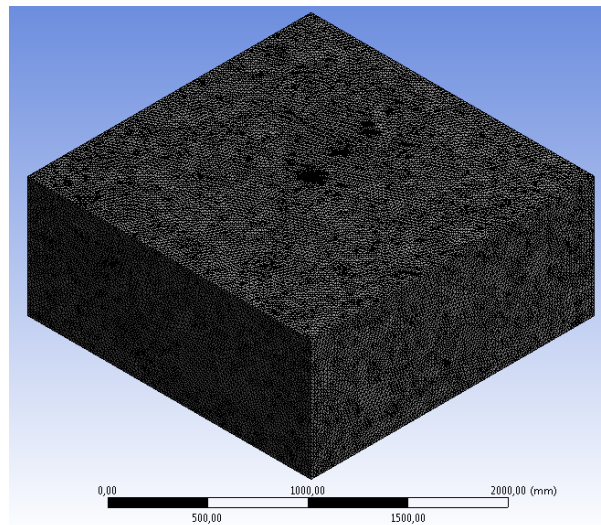


Figura 6. Domino computacional con malla.

Después de haberse realizado el mallado de la geometría del dominio computacional se procede a trasladar a ANSYS-CFX la geometría, esta geometría es el sólido mallado pero listo para dar valores a los atributos de los fluidos y de las condiciones de frontera. Con la geometría en el ANSYS-CFX, se inicia indicando el “tipo de análisis” si el análisis es estacionario o transitorio, para el proyecto se generaron dos tipos de análisis; el primero fue estacionario y el segundo fue transitorio. El estado estacionario indica la temperatura del fuego un segundo antes de la activación de la

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

boquilla de agua nebulizada, esto quiere decir que este dato es $t_0 = 0$ s, este dato realmente no tiene implicaciones importantes ya que a partir del tiempo inicial $t_0 = 0$ s, se considera que el *rack* posee una combustión total y completa; es decir el fuego no crece; se toma como si el crecimiento de este fuese instantáneo en el $t_0 = 0$ s; lo único que se estipula en el estado estacionario es la temperatura de la condición de frontera “entrada de aire” que es el paquete combustible; realizado esto se procede a dar valores a las variables del dominio computacional. En el Anexo 6 se presentan las configuraciones de las simulaciones.

Con las variables del dominio precisadas se procede a definir las condiciones de frontera; se tomaron condiciones de frontera tales como: las condiciones de frontera abiertas, la entrada de agua, la entrada de aire y las paredes o muros.

En la Figura 7 se puede apreciar las condiciones de frontera; las flechas de color azul indican las aberturas del volumen de control; mientras que en la Figura 8 la flecha de color negro en la parte superior indica la entrada de agua al volumen de control y las flechas en la parte inferior indican la entrada de aire del volumen de control, que es donde ingresan los productos de combustión.

Después de cuantificar los valores de las condiciones de frontera se procede a determinar cuáles serán las unidades de solución, si se utilizará sistema internacional o sistema imperial, el número de iteraciones que se realizaron para las

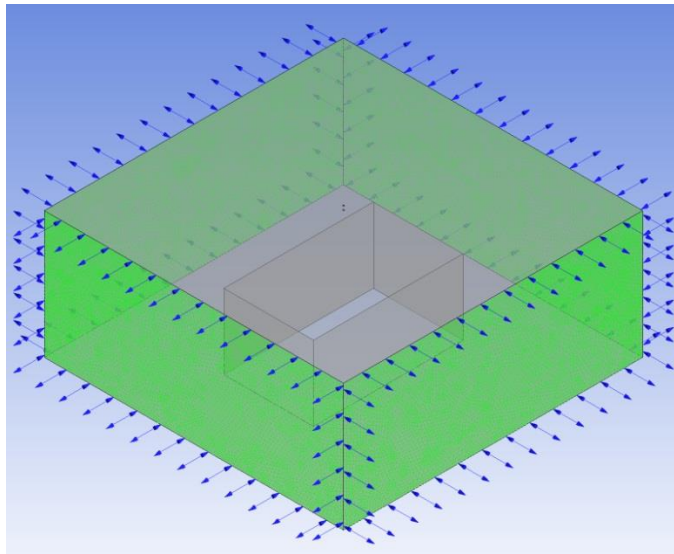


Figura 7. Domino computacional con condiciones de frontera de aberturas.

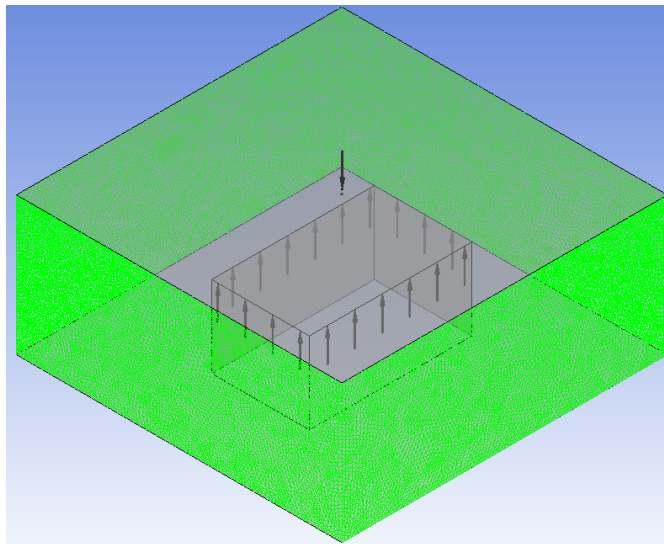
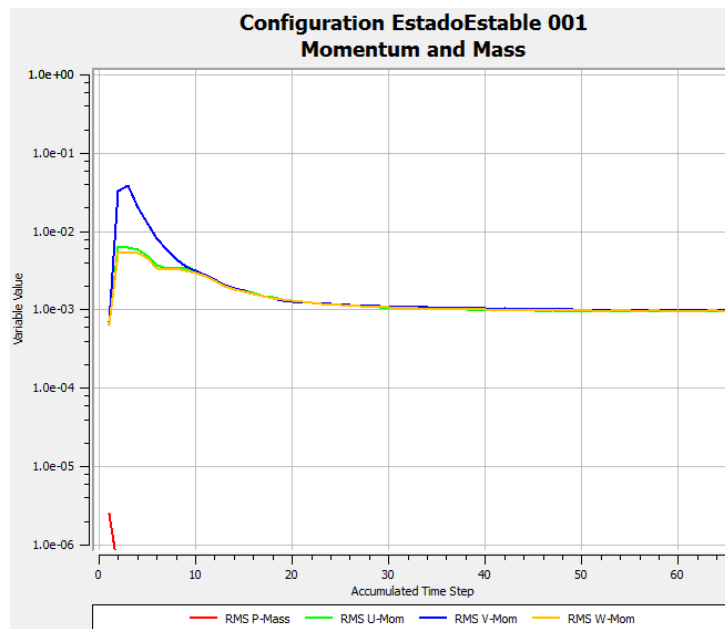


Figura 8. Domino computacional con condiciones de frontera entrada de aire y entrada de agua.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

simulaciones estacionarias fue de 65 iteraciones; ya que en varias simulaciones se pudo apreciar que a partir de la iteración 40, se logra convergencia y teniendo 65 se daba un factor de seguridad de 25 iteraciones. La Gráfica 2 muestra este comportamiento.



Gráfica 2. Convergencia del volumen de control en estado estacionario.

*CAPÍTULO 4**ANÁLISIS DE RESULTADOS*

En esta parte del proyecto se analiza lo que se halló en la investigación y la comparación del modelo de acuerdo a los estudios realizados por *Huang (2011)* y *Yao (2012)*, como parte final de la simulación se encuentra el posprocesado que es donde se analizaron los residuos de las variables de interés tales como temperatura, trayectoria de gotas, tamaño de gotas y presión entre otras.

Al iniciar la simulación; el programa ANSYS-CFX lo que hace es plantear ecuaciones y proporcionar soluciones por medio de algoritmos, la convergencia del ANSYS-CFX indica que esta debe ser la raíz media cuadrada RMS E-04; este valor se considera satisfactorio para los problemas en general y es el que viene por defecto en el programa, este valor solamente lo toma el programa para detener las simulaciones en caso de que alguno de los residuos de las variables converjan en un punto (1E-04), si el programa detiene la simulación quiere decir que alguno de los residuos de las variables tales como: masa y momentum, transferencia de calor, turbulencia, fracción de masa o tasa de cambio de energía de la partícula, convergen en ese punto en un instante determinado.

Se evaluaron las ecuaciones de conservación de masa y momentum y la tasa de cambio de energía de la partícula. Estos residuos de variables se evaluaron para el estado estacionario y para el estado transitorio.

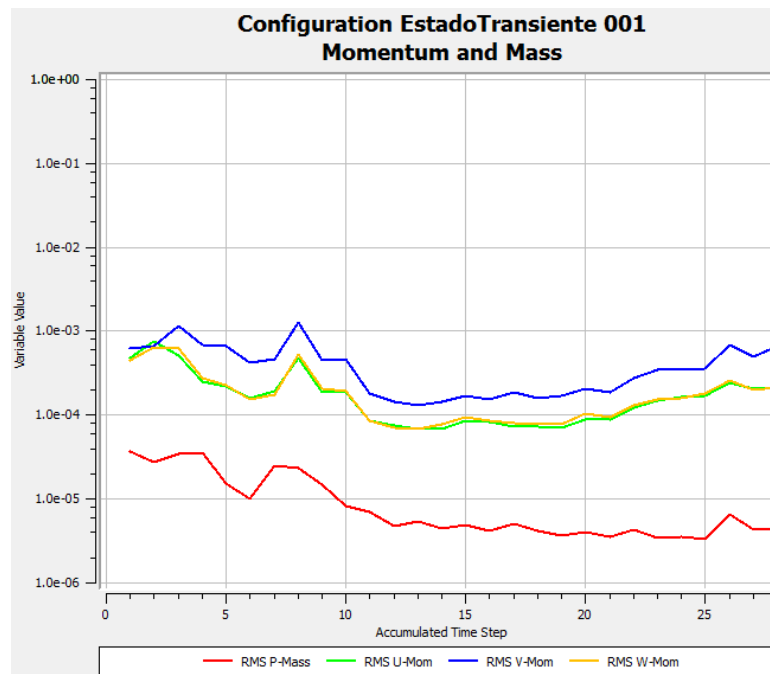
Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Se realizó la simulación para el estado estacionario; ya que el programa precisa a realizar esta simulación y si no se realiza, no es posible realizar la simulación en estado transitorio.

La duración de las simulaciones fue de seis horas y 52 minutos para la simulación en estado estacionario y de 17 horas y ocho minutos para el estado transitorio. El equipo computacional en que se trabajó fue un equipo con un procesador I7 de tercera generación Pentium; la capacidad del equipo en memoria RAM fue de 32 GB y velocidad de 3,9 GHz

A continuación se muestran las gráficas de los resultados del solucionador en estado estacionario y transitorio.

En la Gráfica 3 se pueden estimar los valores de convergencia de los residuos de las ecuaciones de conservación de masa y momentum en el estado transitorio; se puede notar que la convergencia para las ecuaciones de momentum de las partículas de agua en el proceso evaporativo tienen un rango de convergencia entre $1,0 \text{ E-}03$ y $1,0 \text{ E-}04$, la ecuación de conservación de masa tiene un rango entre $1,0\text{E-}04$ y $1,0 \text{ E-}05$. Se puede apreciar que la convergencia no presenta periodicidad a través de la simulación transitoria; esto se debe ya que son flujos multifase y es muy difícil conseguir una periodicidad en la convergencia según Ansys Cap. 8, p. 295.

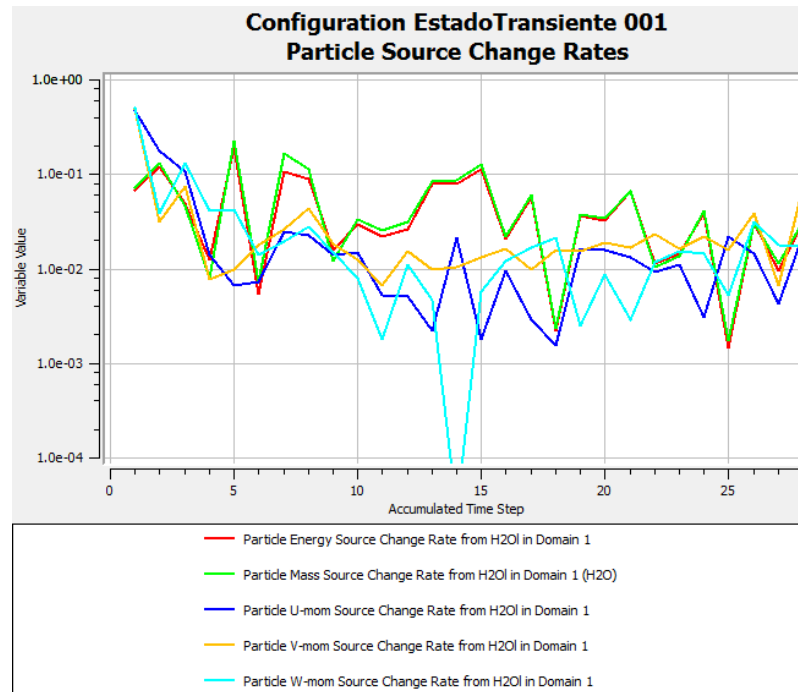


Gráfica 3. Estado transitorio. Valor de residuos de variables de masa y momentum versus intervalo de tiempo.

En la Gráfica 4 se pueden evaluar diferentes parámetros, la tasa de cambio de energía de la partícula de agua, la tasa de cambio de masa de la partícula de agua y la tasa de cambio de las partículas en los ejes x , y y z .

Se puede apreciar que tampoco existe ninguna periodicidad y hay picos máximos y mínimos en la gráfica, muy pronunciados, que se dan de forma casi instantánea y no

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional



Gráfica 4. Estado transitorio. Valor de residuo de variable tasa de cambio de partículas versus tiempo.

presentan periodicidad; esto ocurre como ya se mencionó a que en los flujos multifase es muy difícil conseguir una periodicidad. Más adelante se hace una comparación de los datos obtenidos en el presente documento, respecto a tiempos de extinción y presión de descarga con los datos obtenidos en incendios reales por autores como *Huang (2011)* y *Yao (2012)*.

4.1 Posprocesamiento

Dentro del posprocesamiento lo que se hace es obtener datos numéricos y gráficos de contornos, superficies, vectores y líneas de corriente. Ante la poca documentación que trata el tema de incendios en sólidos y ya que no fue posible realizar el análisis de la fracción de vapor y oxígeno como parámetros en la supresión del fuego; se exponen a continuación los mecanismos según NFPA National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta edición en español. Volumen I. Sección 1., por los cuales la niebla de agua podría extinguir un incendio:

1. Las gotas de agua, mientras se evaporan, eliminan el calor, ya sea en la superficie del combustible o dentro de la llama gaseosa. Este enfriamiento puede producir la extinción del incendio.

2. Las gotitas se evaporan en el ambiente caliente aún antes de llegar a la llama, generando vapor que atenúa y disminuye el porcentaje de oxígeno en el aire cerca de la llama, causando de esta manera la extinción del incendio al no poder efectuarse la combustión sin oxígeno.

3. La niebla bloquea la transferencia de calor radiante entre el fuego y el combustible.

Respecto al mecanismo descrito en el primer punto en lo que se refiere al enfriamiento de los gases, esto se logra si la niebla se rocía directamente hacia el objetivo; en caso contrario que no se encuentre la boquilla directamente sobre el objetivo, estas boquillas tienen un ángulo de descarga de 60° , por lo que se instalarían de manera que la descarga de agua nebulizada se entrelace antes de llegar al objetivo, esto infiere que se requerirían más boquillas por objetivo.

Ante la falta de documentación sobre extinción de incendios en sólidos, para el proyecto se tomó el criterio de extinción del mecanismo uno y tres, ya que adicional la boquilla que descarga niebla de agua se encuentra justamente sobre el paquete combustible. Para hacer más conservador el cálculo; se tomó un primer criterio de extinción, que fue; cuando el paquete combustible tenga una temperatura promedio inferior a los (100°C) ; el incendio se considera extinguido; ya que a esta temperatura el agua nebulizada solamente enfriará el paquete combustible y no se evaporará ya más; esto quiere decir que si el paquete combustible se encuentra a una temperatura de 99°C o menor a 99°C , se considera el incendio extinguido; también se tomó adicional un

segundo criterio aún más conservador, se tomó también como temperatura de extinción el enfriamiento del paquete combustible; esto es; cuando el paquete combustible en el volumen de control tuviera una temperatura promedio cercana a la temperatura ambiente, se consideran que ha sido enfriado y por ende el incendio extinguido.

A continuación se exponen las dos simulaciones realizadas, se realizaron dos simulaciones, ya que los datos que se requerían cambiar en cada simulación eran los de la presión con que se descarga el agua nebulizada sobre el fuego, el flujo másico y el diámetro de las gotas descargadas por la boquilla.

4.1.1 Simulación para una presión de 203 psi

A continuación se muestran las figuras de contornos de temperatura, que expresan los gradientes de temperatura, las temperaturas de las condiciones de frontera y las trayectorias de las gotitas de agua. Se muestran tiempos $t = 0$ s, $t = 1$ s, $t = 5$ s, $t = 20$ s y $t = 28$ s. Los tiempos restantes se presentan en el Anexo 1 donde se exponen las figuras, en las que se presenta el comportamiento del volumen de control en intervalos de tiempo de dos segundos.

La Figura 9 representa los contornos de temperatura en el estado estacionario; es decir en $t_0 = 0$ s; en un plano de corte ubicado en el centro del volumen de control, la boquilla se activara un segundo después, la parte roja indica la temperatura más

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

elevada, $T = 415,7 \text{ }^\circ\text{C}$ y la parte azul indica la región de más baja temperatura, $T = 20,93 \text{ }^\circ\text{C}$. Se puede apreciar la diferencia de temperaturas un segundo antes de activarse la boquilla.

La Figura 10 representa el volumen de control un segundo después de haberse activado la boquilla, donde se muestra la temperatura de las gotas de agua nebulizada.

La Figura 11 representa los contornos de temperatura en un plano de corte ubicado en el centro del volumen de control, en un tiempo $t = 5 \text{ s}$, se puede apreciar que cinco segundos después de haberse activado la boquilla de agua nebulizada se presentan turbulencias y cambios de temperatura, estos cambios de temperatura son generados por la evaporación de las gotas de agua sobre el paquete combustible, se puede apreciar que la temperatura en el plano del volumen de control ha disminuido $\approx 73 \text{ }^\circ\text{C}$.

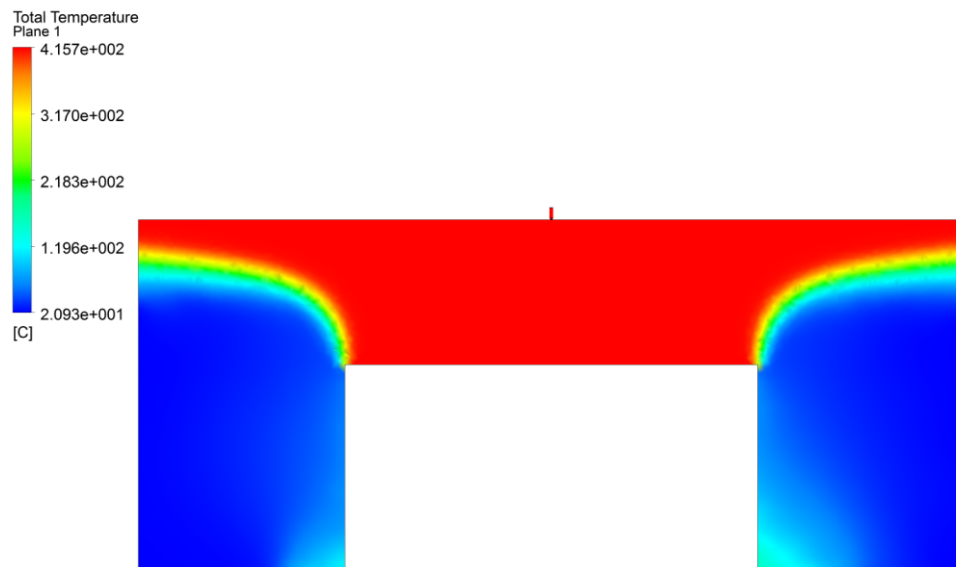


Figura 9. Contornos de temperatura para $t = 0 \text{ s}$.

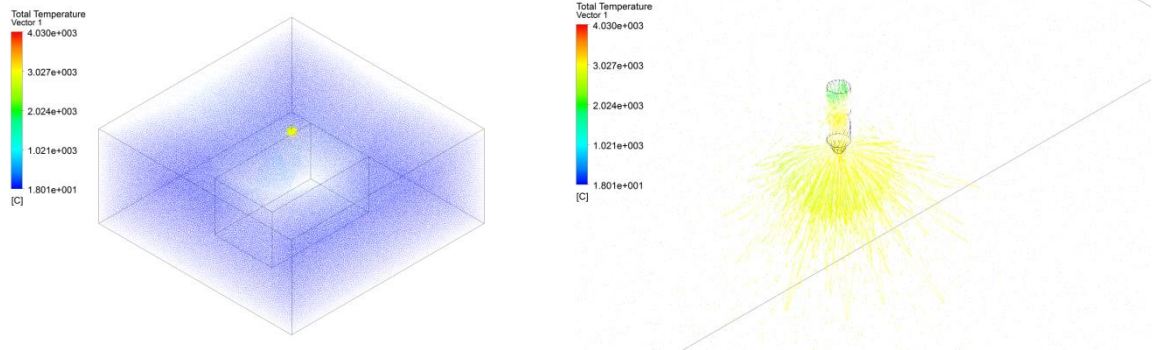


Figura 10. Temperaturas de las gotas de agua nebulizada para $t = 1$ s.

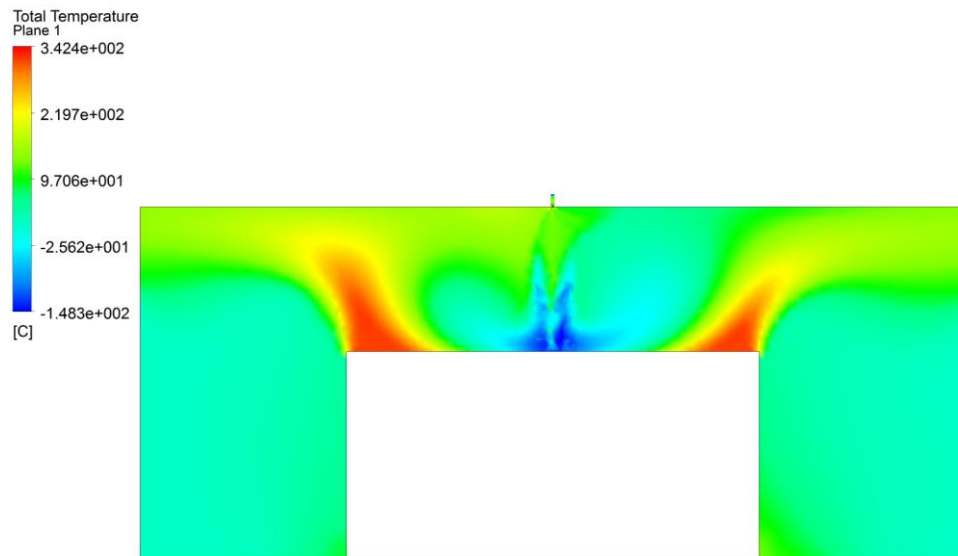


Figura 11. Contornos de temperatura para $t = 5$ s.

Respecto al paquete combustible en la Figura 12 se puede apreciar ardiendo con una temperatura aproximada de $415\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un tiempo $t = 0$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

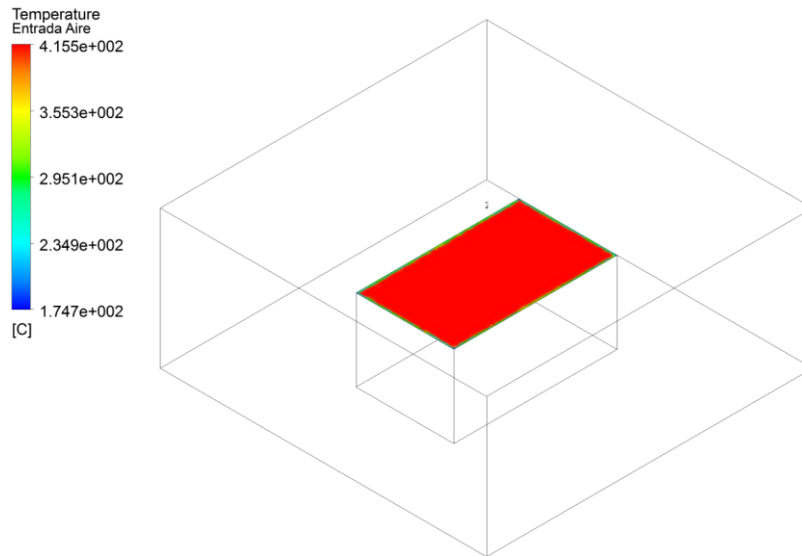


Figura 12. Condición de frontera entrada aire en un tiempo $t = 0$ s. Estado estable

Al utilizar la función “*calculators*” del programa, se pudo determinar que la extinción del incendio ocurre en un tiempo $t = 20$ s; se pudo comprobar con esta función que la temperatura promedio en la condición de frontera de entrada de aire fue de 368,5 K ó 95,35 °C, esto determina que se cumple el primer criterio de extinción. La Figura 13 muestra el paquete combustible en el tiempo de extinción del incendio $t = 20$ s.

Al observar las Figuras 10 y 13 se puede apreciar que las gotas de agua que no están justamente sobre el paquete combustible, no sufren proceso evaporativo, por lo tanto se puede estimar que el comportamiento de las gotas de agua nebulizada, alejadas del paquete combustible es muy similar tanto en un tiempo $t = 1$ s como en un tiempo $t = 20$ s.

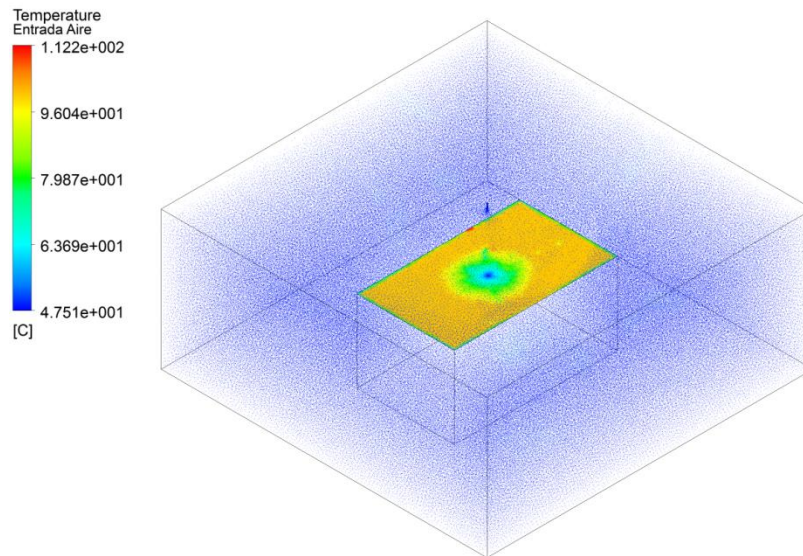


Figura 13. Condición de frontera entrada aire en un tiempo $t = 20$ s. Extinción del incendio.

En la Figura 14 se pueden apreciar los contornos de temperatura en el paquete combustible y las trayectorias de las gotas de agua nebulizada, nótese que la zona del paquete combustible donde el agua impacta, tiene una temperatura aproximada de $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la zona restante del paquete combustible posee una temperatura de aproximadamente $98\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El tamaño promedio de la partícula de agua nebulizada se da por el “*averaged sauter mean particle diameter*”. Esta variable para el primer criterio de extinción con un tiempo de 20 s, fue de $161\text{ }\mu\text{m}$. Se obtiene el dato del “*averaged sauter mean particle diameter*” en el “dominio 1” que es el mismo volumen de control donde se desarrolla todo el proceso.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

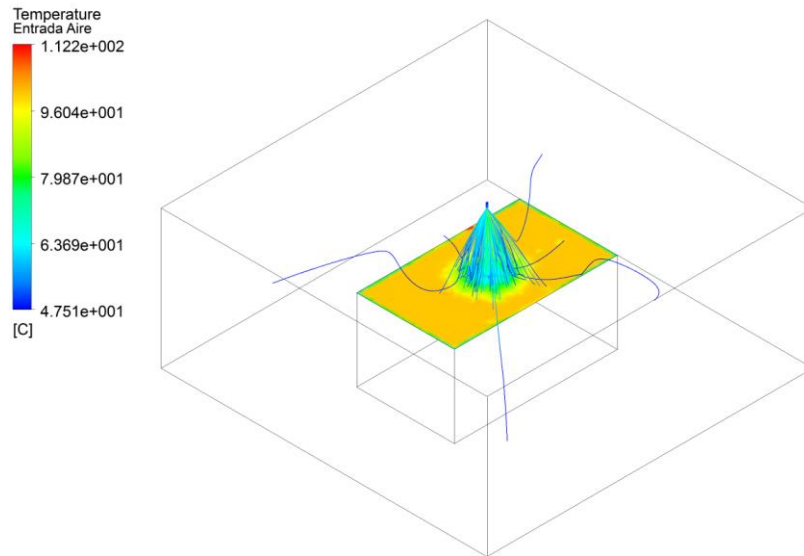


Figura 14. Trayectoria de las gotas de agua ilustradas con temperatura y contornos de temperatura del paquete combustible en un tiempo $t = 20$ s. Extinción del incendio.

Ahora se procede a exponer la simulación con el *segundo criterio de extinción* que se tomó; que consiste en evaluar la temperatura, cuando el paquete combustible en el volumen de control adquiriera una temperatura promedio cercana a la temperatura ambiente, se considera que el paquete combustible ha sido enfriado y por ende el incendio extinguido.

El comportamiento es idéntico en las primeras etapas del incendio como se mostró en las Figuras 10, 11, 12 y 13, ya que es la misma simulación, las diferencias se presentan en el momento de la extinción.

Al emplear la función “*calculators*” del programa, se pudo determinar que la extinción del incendio ocurre en un tiempo $t = 28$ s; se pudo comprobar con esta función que la temperatura promedio en la condición de frontera entrada aire fue de 295,6 K ó 22,5 °C, esto determina que se cumple el segundo criterio de extinción. La Figura 15 exhibe el paquete combustible en el tiempo de extinción del incendio $t = 28$ s.

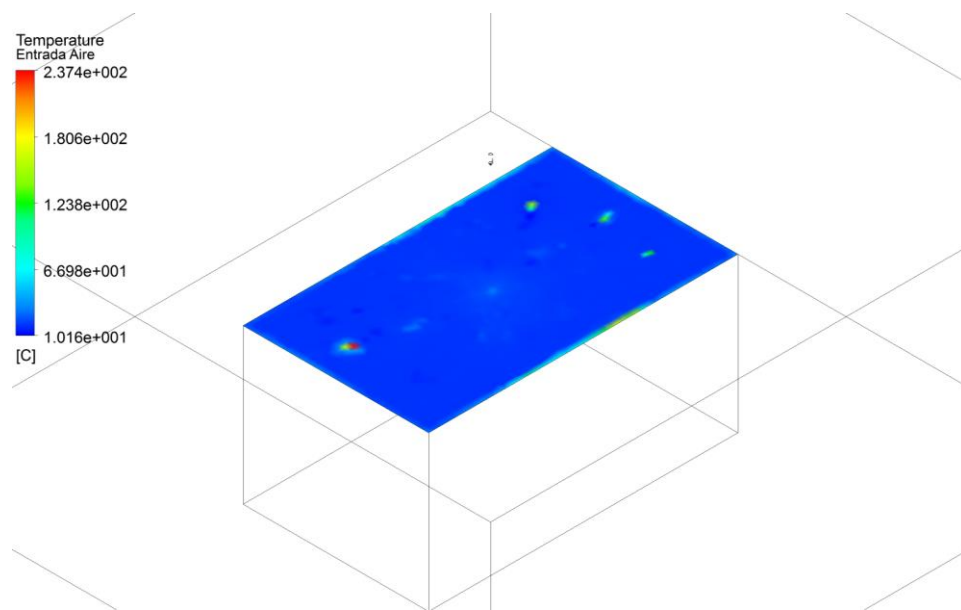


Figura 15. Condición de frontera entrada aire en un tiempo $t = 28$ s. Extinción del incendio.

En la Figura 16 se pueden apreciar los contornos de temperatura en el paquete combustible y las trayectorias de las gotas de agua nebulizada, nótese que la zona del

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

paquete combustible tiene una temperatura generalizada aproximada a la temperatura ambiente, que para el caso se tomó la temperatura ambiente en un centro de cómputo que aproximadamente es de 23 °C, los puntos en azul claro y los puntos rojos en el paquete combustible, son temperaturas mayores a la temperatura ambiente.

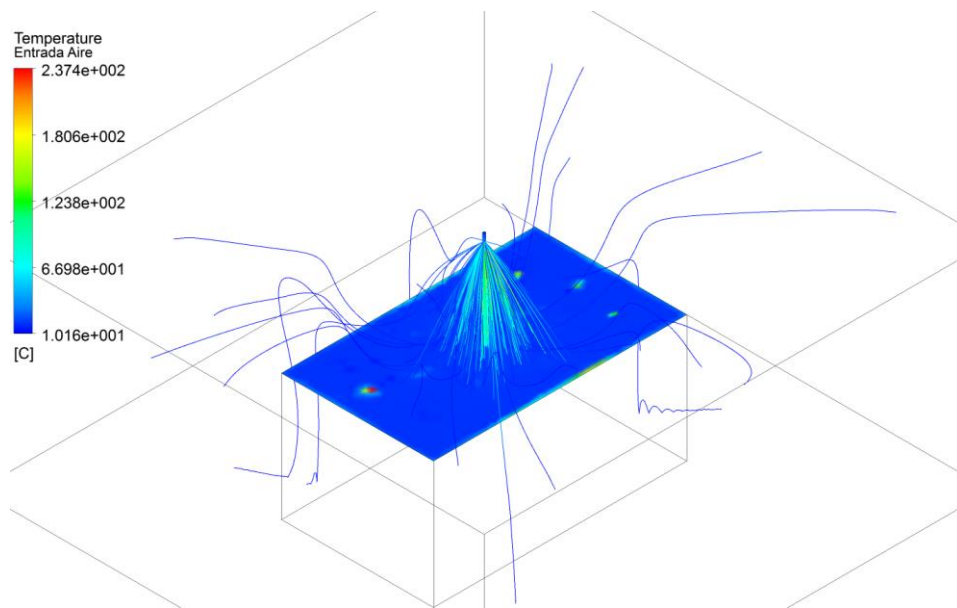


Figura 16. Trayectoria de las gotas de agua ilustradas con temperatura y contornos de temperatura del paquete combustible en un tiempo $t = 28$ s. Extinción del incendio.

El tamaño promedio de la partícula de agua nebulizada se da por el “*averaged sauter mean particle diameter*”. Este residuo de variable para el segundo criterio de extinción con un tiempo de 28 segundos, fue de 161 μm .

4.1.2 Simulación para una presión de 101 psi

Se realizó otra simulación exactamente igual a la anterior, con los mismos parámetros, excepto por la presión de la condición de frontera de entrada de agua que para esta segunda simulación fue de 101 psi, esto tiene que ver con que a mayor sea la presión de velocidad de descarga de la pulverización, mayor es la cantidad de agua aplicada al riesgo y viceversa, también cambió el flujo másico de entrada de agua al volumen de control que para esta simulación fue de 0,085 kg/s.

Ya que la presión varió de la primera simulación de 203 psi a esta segunda simulación de 101 psi, esta presión es medida en la salida de la boquilla de agua nebulizada.

A continuación se muestran las figuras de contornos de temperatura, vectores que expresan los gradientes de temperatura, las temperaturas de las condiciones de frontera y las trayectorias de las gotas de agua. Se muestran tiempos $t = 5$ s, 28 s y 40 s. El comportamiento del volumen de control es exactamente el mismo que para la primera simulación en el tiempo $t = 0$ s, como se muestra en la Figura 12.

La Figura 17 representa los contornos de temperatura en un plano de corte ubicado en el centro del volumen de control para la segunda simulación, en un tiempo $t = 5$ s, se puede apreciar que cinco segundos después de haberse activado la boquilla de agua nebulizada se presentan turbulencias y cambios de temperatura, estos cambios de temperatura son generados por la evaporación de las gotas de agua sobre el paquete combustible se puede

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

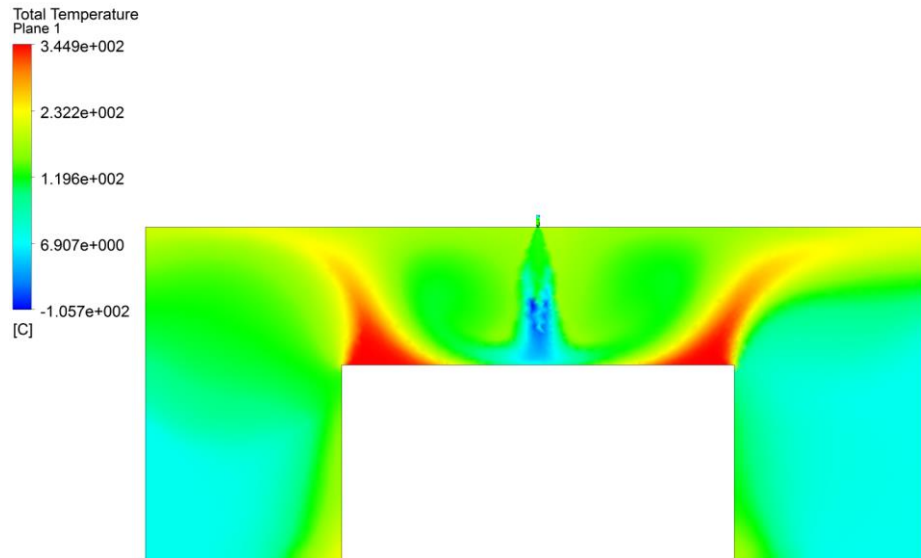


Figura 17. Contornos de temperatura. En tiempo $t = 5$ s.

apreciar que la temperatura en el plano del volumen de control disminuyó 71 °C. Dos grados centígrados menos que en la simulación para una presión de 203 psi, donde la temperatura disminuyó 73 °C.

Al utilizar la función “*calculators*” del programa, se pudo determinar que la extinción del incendio ocurre en un tiempo $t = 28$ s; se pudo comprobar con esta función que la temperatura promedio en la condición de frontera entrada aire fue de $372,56$.K ó $99,41$ °C, esto determina que se cumple el primer criterio de extinción. La Figura 18 muestra el paquete combustible en el tiempo de extinción del incendio $t = 28$ s.

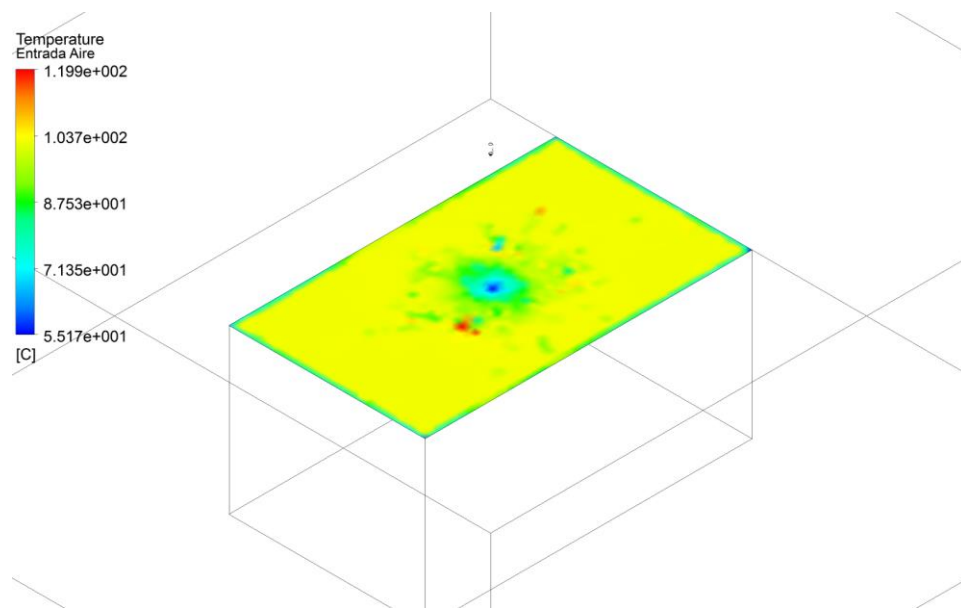


Figura 18. Extinción del incendio para un tiempo $t = 28s$.

El tamaño promedio de la partícula de agua nebulizada se da por el “*averaged sauter mean particle diameter*”. Este residuo de variable para el primer criterio de extinción con un tiempo de 28 s, fue de 211 μm .

Ahora se procede a exponer la simulación con el *segundo criterio de extinción* que se tomó; que consiste en evaluar la temperatura, cuando el paquete combustible en el volumen de control adquiriera una temperatura promedio cercana a la temperatura ambiente, se considera que el paquete combustible ha sido enfriado y por ende el incendio extinguido. El comportamiento es idéntico en las primeras etapas del incendio ver Figura 12, las diferencias se presentan en el momento de la extinción.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Al emplear la función “*calculators*” del programa, se pudo determinar que la extinción del incendio ocurre en un tiempo $t = 40$ s; se pudo comprobar con esta función que la temperatura promedio en la condición de frontera entrada aire fue de 290,83 K ó 17,68 °C, esto determina que se cumple el segundo criterio de extinción. La Figura 19 exhibe el paquete combustible y las trayectorias de las gotas de agua nebulizada en el tiempo de extinción del incendio $t = 40$ s.

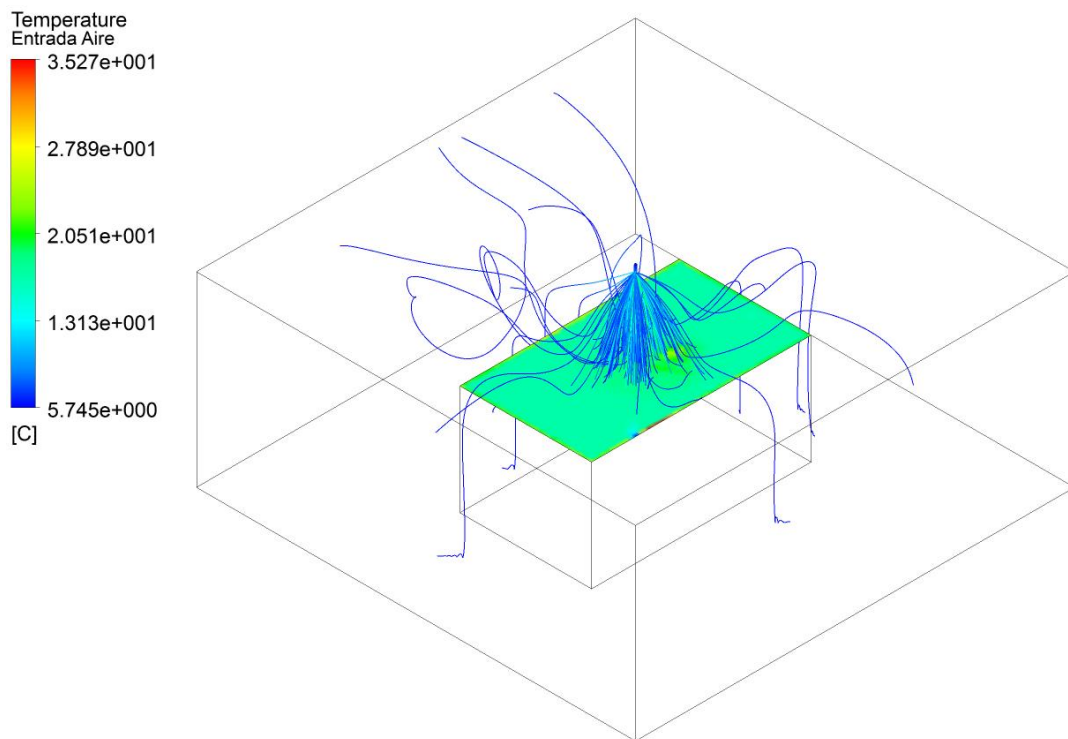


Figura 19. Trayectoria de las gotas de agua ilustradas con temperatura y contornos de temperatura del paquete combustible en un tiempo $t = 40$ s. Extinción del incendio.

El tamaño promedio de la partícula de agua nebulizada se da por el “*averaged sauter mean particle diameter*”. Este residuo de variable para el segundo criterio de extinción con un tiempo de 40 s, fue de 211 μm .

La Tabla 7 es una tabla comparativa de las dos simulaciones donde se presentan los resultados de temperatura, tiempos de extinción y diámetros de partículas de agua en función de la presión de cada simulación.

Tabla 6. *Comparativo de simulaciones para presiones de 203 psi y 101 psi*

1a Simulación		2a Simulación	
Presión	203 psi	Presión	101 psi
Descenso promedio de temperatura para t = 5s	73 °C	Descenso promedio de temperatura para t = 5s	71 °C
Tiempo de extinción primer criterio	20 s	Tiempo de extinción primer criterio	28 s
Diámetro medio "sauter" de primer criterio	161 μm	Diámetro medio "sauter" de primer criterio	211 μm

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Tiempo de extinción segundo criterio	28 s	Tiempo de extinción segundo criterio	40 s
Diámetro medio "sauter" de segundo criterio	161 μm	Diámetro medio "sauter" de segundo criterio	211 μm

4.1.3 Sistema de energía alternativa para alimentar la bomba del sistema de agua nebulizada.

A continuación se presenta la Tabla 9, donde se presentan las diferentes variables de las memorias de cálculo, para un panel de energía solar fotovoltaica, se puede apreciar que la bomba es una bomba de 5 hp y debe trabajar al menos 30 minutos, se puede distinguir que el área de captación de energía solar es un área relativamente pequeña, ya que solamente ocuparía 5,63 m², esto es equivalente a un área de un cuadrado de 2,38 m por 2,38 m.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Tabla 7. *Memorias de cálculo de un panel de energía solar fotovoltaica.*

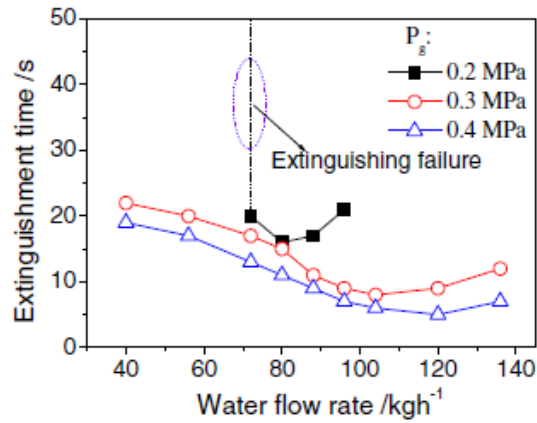
Extracto memorias de cálculo						
Cant.	Descripción de las cargas	Consumo unitario en vatios	Horas de uso diario	Potencia Nom. en vatios	W/H día	Unidad
1	Bomba 5 hp	3,730	0,50	3,730	1865	Wh/día
Totales				3,730	1865	Wh/día
Tipo de sistema:		1	Autónomo			
Voltaje DC del sistema		48	Wh/día con pérdidas		2,072	Wh/día
Número de baterías en serie		4	Potencia planta solar		606	Watt
Eficiencia del inversor		0,90	Capacidad del banco de baterías		106	AH.
Radiación solar (kWh/m ² /day)		3,8	Potencia inversor		5000	Watt.
Bogotá						
Autonomía (días de operación sin sol)		2	Corriente controlador de carga		15	Amp.
Potencia Wp de los paneles solares		180	Número de paneles requeridos		3,4	Unid.
Voltaje de trabajo del panel escogido		24	Número de paneles en serie		2,0	Unid.
			Número de paralelos		1,7	Wp
Eficiencia de los paneles		14%	Área de la superficie captadora		5,63	m ²

4.2 Comparación del modelo

Ante la escasa documentación respecto a la extinción de incendios en sólidos, se tomó como criterio de aceptación de extinción del fuego en el proyecto, los estudios realizados sobre el tema; donde se encontró que a variadas presiones; entre mayor fuera la presión de velocidad del agua nebulizada, menor era el tiempo de extinción y viceversa; la Gráfica 5 muestra esta tendencia en un incendio de combustible tipo diésel. La Tabla 8 también muestra esta tendencia en las simulaciones para presiones de 203 psi y 101 psi.

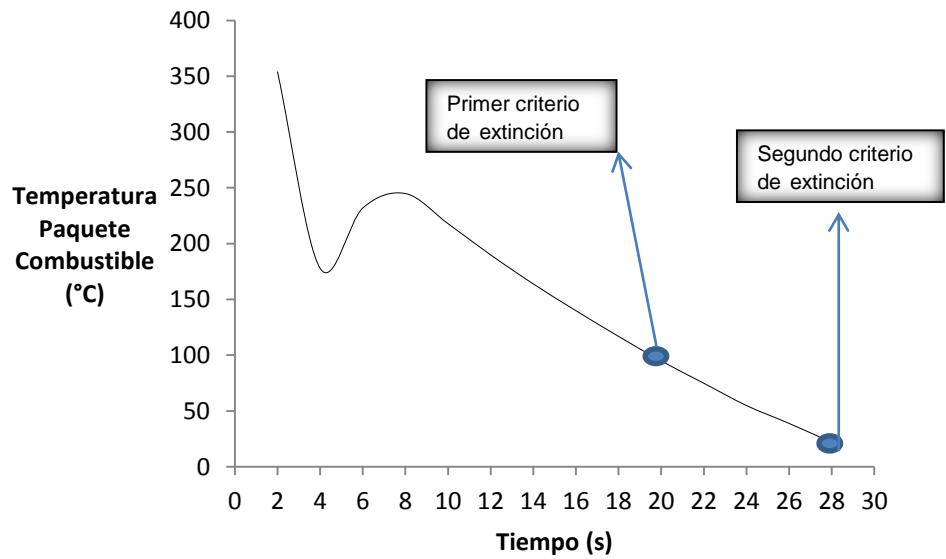
Considerando la Grafica 5, se empleó una boquilla instalada a dos metros de distancia del incendio; se utilizó un incendio de cubeta para la prueba de un incendio de piscina; el incendio poseía unas dimensiones de 0,22 m con una altura de 0,04 m. La extinción a 29 psi ó 0,2 MPa ocurre aproximadamente en un tiempo entre 20 y 23 s y para 43,51 psi ó 0,3 MPa ocurre en tiempos que van desde los 8 s hasta los 22 s aproximadamente, *Huang (2011)*. Realizando la comparación respecto al tiempo de extinción del incendio planteado en la simulación, este se extinguió en tiempos de 20, 28 y 40 s, por lo que se consideran lógicos los resultados respecto a la comparación del modelo, ya que el combustible utilizado en las simulaciones es poliimida y el combustible utilizado experimentalmente es diésel, con la poliimida los tiempos de extinción en las simulaciones, ver Graficas 6 y 7, son similares a los tiempos de extinción con combustible diésel. Siendo más inflamable el diesel que la poliimida.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional



Gráfica 5. Tiempos de extinción bajo diferentes presiones de operación y flujos máxicos.

Fuente. Huang, 2011.

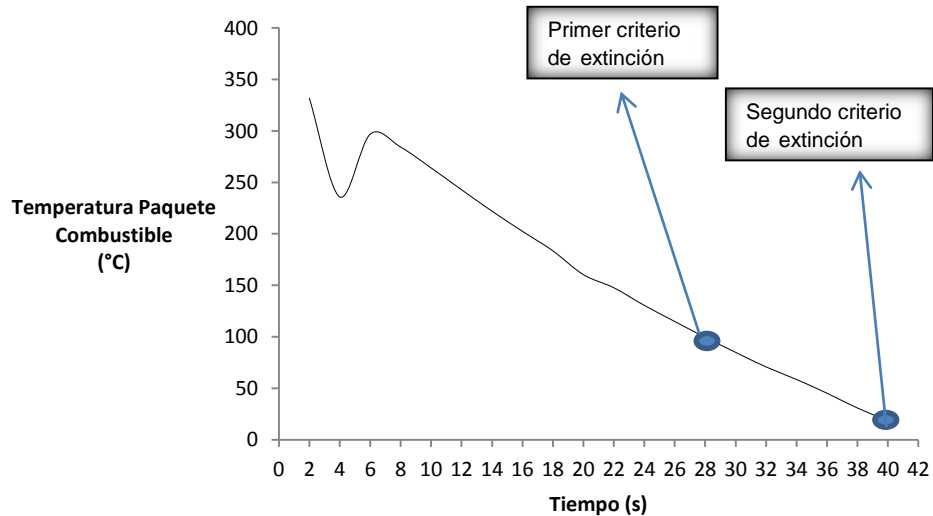


Gráfica 6. Tiempos de extinción bajo una presión de 203 psi.

Adicional se tomó como referencia para la comparación, la supresión de un incendio de metilmetacrilato, la fuente del incendio tiene dimensiones de 0,5 m por 0,5 m y 10 mm de espesor. El sistema de agua nebulizada operó a una presión de 29 psi; se realizó la extinción del incendio en un tiempo de 72,3 s. Así mismo se tomó como información, la experimentación sobre el mismo incendio de metilmetacrilato, pero con una presión de operación de 116 psi, el incendio se extinguió en tan solamente 7,2 segundos, *Yao (2012)*. Se puede estimar que comparando los datos del incendio de metilmetacrilato, estos tienen un comportamiento similar a los datos generados en la simulación, y a la Grafica 5, que considera un incendio de combustible tipo diésel, ya que a menor presión de velocidad, el tiempo de extinción fue más largo y a mayor presión de velocidad el tiempo de extinción disminuyo considerablemente, ver Tabla 6 y Tabla 8.

Por lo que se deriva; ya que la presión de operación en la boquilla de descarga del proyecto maneja unas presiones de trabajo de 203 psi y de 101 psi y el incendio es en la parte superior del gabinete (rack) y es un área de incendio más grande 1 m de profundidad y 0,60 m de ancho; que los incendios con los que se comparó, el incendio en combustible diésel y el incendio en metilmetacrilato, que los resultados son lógicos.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional



Gráfica 7. Tiempos de extinción bajo una presión de 101 psi.

La Tabla 8 es un resumen de las pruebas experimentales contenidas en el título “Comparación del modelo” esta comparación se hizo según las experimentaciones de autores como *Huang (2011)* y *Yao (2012)*, se puede apreciar que según la Tabla 8 a mayor presión de velocidad en la boquilla, es menor el tiempo de extinción, esto también se presentó en la comparación entre las simulaciones y se puede apreciar en la Tabla 6. Se presenta el mismo comportamiento tanto en las pruebas experimentales de *Huang (2011)* y *Yao (2012)* como en las simulaciones; a pesar de las diferencias en los paquetes combustibles.

Tabla 8. *Comparativo de tiempos de extinción según pruebas a escala.*

Tipo de combustible – Diésel, <i>Huang (2011)</i>		Tipo de combustible – Metilmetacrilato, <i>Yao (2012)</i>	
Dimensiones del incendio	0,22 m X 0,22 m X 0,04 m	Dimensiones del incendio	0,5 m X 0,5 m X 5 mm de espesor
Tiempo de extinción para una presión de 29 psi	Entre 20 y 23 s dependiendo del flujo másico	Tiempo de extinción para una presión de 29 psi	72,3 s
Tiempo de extinción para una presión de 44 psi	Entre 8 y 22 s dependiendo del flujo másico	Tiempo de extinción para una presión de 116 psi	7,2 s

Conclusiones

En esta parte del proyecto se enuncian los hallazgos del proyecto, dentro de estos hallazgos se concluye lo siguiente:

- Al tener una presión mayor en un sistema de agua nebulizada, las velocidades de descarga son directamente proporcionales a esta, conduciendo a una extinción más rápida a mayor velocidad de impulsión. Esto se evidenció ya que por ejemplo en una revisión a la Tabla 6 se puede apreciar que los tiempos de extinción con la boquilla que descarga agua nebulizada a 203 psi son más cortos tanto para el primer como para el segundo criterio de extinción que para la boquilla que descarga a 101 psi.

- Realizando la comparación entre un sistema de agua nebulizada y un sistema de rociadores; se tiene que el sistema de agua nebulizada consume aproximadamente el 20 % de potencia de lo que consume un sistema de rociadores tradicional. Esto se evidencia de acuerdo al numeral 1.2.1, donde se realizan los cálculos para una bomba de un sistema de rociadores.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

- Respecto a la comparación de consumo de agua de los sistemas de agua nebulizada contra un sistema de rociadores, ver numeral 1.2.1. Los sistemas de agua nebulizada ahorran aproximadamente el 95 % del consumo del sistema de rociadores tradicional.

- Sí es posible utilizar un sistema alternativo de energía al del funcionamiento de las bombas tradicionales que operan con motores diésel o con energía eléctrica; ya que los consumos de las bombas que impulsan el agua nebulizada son bajos, cercanos a los 5 caballos de potencia, comparados con las bombas diésel o eléctricas, es totalmente viable instalar un sistema que energice la bomba por medio de energías alternativas. Ver Tabla 7.

- El agua nebulizada es un agente eficaz para reemplazar los sistemas de extinción por medio de agentes limpios y de gases inertes, ya que se vaporiza rápidamente, no deja residuos y adicional no produce problemas de índole ambiental y no es perjudicial para la salud humana.

- Ya que los dos criterios de extinción; solamente poseen una diferencia de ocho segundos para la simulación con una presión de descarga de 203 psi y doce segundos para la simulación con una presión de descarga de 101 psi, respectivamente, se deduce que la extinción en este escenario parece ser posible.

- Al analizar los diámetros medios de la partícula, este parámetro juega un papel importante para esta diferencia de presiones, ya que la variación que se observó fue de 50 μm .

- La posibilidad de tener temperaturas negativas en los procesos de extinción de incendios, obedece a la probabilidad de manejar diferenciales de tiempo muy pequeños donde se evidencia la sofocación de la conflagración parametrizada por resultados derivados de la modelación. Se consultó este tema con diferentes empresas que se encargan del tema de incendios como lo es el instituto de atomización de Tokio y con el representante del fabricante en Brasil del ANSYS-14.5 CFX (ESSS); donde aducen que si es posible obtener temperaturas negativas en el proceso de modelación en diferenciales de tiempo tendiendo a cero. Los correos electrónicos se incorporan en el Anexo siete.

Recomendaciones y sugerencias

- Se sugiere para estudios futuros, evaluar el paquete combustible con madera u otro material que presente un desafío aun mayor que la poliimida, esto para determinar si el agua nebulizada también es indicada para la extinción de este tipo de incendios.

- Sería importante para la industria del agua nebulizada. Que antes de diseñar una boquilla; realizar el planteamiento previo con una herramienta tan importante como la dinámica de fluidos computacional, así podría determinar ángulos de descarga, presiones de descarga, flujos máxicos, tipo de boquilla y otros parámetros útiles en la investigación incipiente del agua nebulizada en la extinción de incendios.

- de acuerdo a las simulaciones realizadas se puede concluir que el modelo de turbulencia que viene por defecto del programa, es el más apropiado para las simulaciones multifase, ya que al cambiar a otros modelos de turbulencia, tales como los modelos de turbulencia de ecuación de transporte de viscosidad de Eddy, el modelo de transporte de esfuerzo cortante y otros, las simulaciones siempre presentaban falla.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

- Los parámetros de supresión de incendios en sólidos a diferencia de los parámetros de supresión de incendios en líquidos que permiten calcular concentración de oxígeno y concentración de cada componente químico de la sustancia; deben modificarse; ya que el posprocesador del programa no entrega este tipo de datos en sólidos; genera datos del aire y del vapor de aire, sin especificar componente químico de estos.

- Al hacer una malla más densa para el dominio, los resultados de convergencia tienden a ser más exactos; es decir tienden a cero, pero requieren mayor costo computacional, es decir las simulaciones se hacen más extensas en tiempo. Teniendo exactamente los mismos parámetros de condición de frontera y propiedades de fluidos.

Referencias

- Adiga K. C., R. F., Hatcher Jr., R. S. Sheinson, F. W. & Scott Ayers, w. (2007). *A computational and experimental study of ultra-fine water mist as a total flooding agent fire*. Safety Journal 42. p. 150–160.
- Ansys Ansys CFX. (2011). *Solver theory guide*. Capítulos 1 y 5. Noviembre.
- Ansys Ansys CFX. (2011). *Solver theory guide*. Cap. 8, p. 295. Noviembre.
- Back III, G. G. (2000). *Craig L. Beyler, Rich Hansen, A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems*. Fire Safety Journal 35. p. 327-362.
- Bust, G. *Las poliimidias*. Departamento de ciencias de polímeros, universidad del sur de Mississippi. <http://pslc.ws/spanish/imide.htm>.
- Chaker, M. & Ph. D. Director. (2002). *Research and Development; Cyrus B. Meher-Homji Chief Engineer; Thomas Mee III, Chairman and CEO, Inlet Fogging Of Gas Turbine Engines - Part A: Fog Droplet Thermodynamics, Heat Transfer And Practical Considerations Proceedings of ASME Turbo Expo*. June 3-6. Amsterdam.
- Chelliah, H. K. (2007). *Flame inhibition/suppression by water mist: Droplet size/surface area, flame structure, and flow residence time effects*. Proceedings of the Combustion Institute 31. p. 2711–2719.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Chen Zu-ming, LI De pin. (2011). *Numerical Simulation of Water Mist Fire Suppression Technology*. Procedia Engineering 11. p. 205–209.

Danardono, A., Sumarsono, Y. S. Nugroho, M. & I. Gede, W. W. (2010). *Ariasa Concept Design And Testing Of Multi-Nozzle Water Mist Fire Suppression System*. Vol. 14. No. 2. November. p. 138-142.

Derrick, A.& Martec, E. L. (2009). *Limited, Water Mist Fire Suppression Modeling*. p. 132.

Emerson Electric de Colombia. (2012). *Emerson network power, knurr* (accessed 01-Nov.) <http://www.emerson.com>.

Ferng, Y. M.& Liu, C. H. (2011). *Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code*. Nuclear Engineering and Design. 241. p. 3142– 3148.

Hall, J. R. (2001). *Fire Analysis and research division*. NFPA. July.

Hi-Fog for large data centers. (2011). *Mission- critical Fire Protection*.

Huang X., X.S.& Wang, G.X. L. (2011). *Characterization of an effervescent atomization water mist nozzle and its fire suppression tests*. Proceedings of the Combustion Institute 33. P. 2573–2579.

Industrial Hydraulic Spray Products. *Spraying Systems Co*.

- Jianghong, L., Guangxuan, J., Peide, Li. (2003). *Progress in research and application of water mist fire suppression technology*. Chinese Science Bulletin. Vol. 48 No.8. p. 718 – 725.
- Liang, T., Siuming, L., Xishi, W. & Guangxuan, L. (2012). *A Numerical study of the Fire-extinguishing Performance of Water Mist in an Opening Machinery Space*. Procedia Engineering 31. p. 734 – 738.
- Liu, J., Liao, G., Li, P., Qin, J. & Lu, X. (2002). *Experimental study on the interaction of fine water mist with solid pool fires*. October 20. Vol. 46. No. 2.
- Mawhinney P., J. R. *Eng national research council Canada*. Engineering criteria for water mist fire suppression systems.
- NFPA 750. National Fire Protection Association. (2006). *Estándar sobre sistemas de protección contra incendios con agua nebulizada*. Edición. 2006.
- NFPA 13. National Fire Protection Association. (2013). *Norma para la instalación de sistemas de rociadores*. Edición. 2013.
- NFPA. National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta Edición en español. Volumen II. Sección 11. Capítulo 20. p.189 – 194.
- NFPA. National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta Edición en español. Volumen II. Sección 8. Capítulo 15. p. 237-268.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

NFPA National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta edición en español. Volumen II. Sección 10. Capítulo 5. p. 85-96.

NFPA National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta edición en español. Volumen I. Sección 2. Capítulo 4. p. 39-52.

NFPA National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta edición en español. Volumen I. Sección 1. Capítulo 4. p. 47-58.

NFPA National Fire Protection Association. (2009). *Manual de protección contra incendios*. Quinta edición en español. Volumen II. Sección 9. Capítulo 1. p. 9-4.

NFPA 20. (2010). *National Fire Protection Association, norma para la instalación de bombas estacionarias de protección contra incendios*. Edición 2010. p. 22-26, 30-32.

NFPA 92. National Fire Protection Association. (2012). *Norma para los sistemas de control de humo*. Edición 2012.

Prasad, P., Patnaik, G.& Kailasanath, K. (2002). *A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires*. Fire Safety Journal 37 p.569-589.

REFERENCIAS

- Qin, J., Weng, W. G. (2006). *Preliminary study of water mist suppressing ghee flame in historical building in the northwest China*. Journal of Cultural Heritage 7. p. 329–333.
- Rahimi, R., Abbaspour, D. (2008). *Determination of pressure drop in wire mesh mist eliminator by CFD*. Chemical Engineering and Processing 47. p. 1504–1508.
- Richard, J., Garo, J. P., Souil, J. M. & Vantelon, J. P. (2003). *On the flame structure at the base of a pool fire interacting with a water mist*. Experimental Thermal and Fluid Science 27. p. 439–448.
- Santangelo, P. E. (2010). *Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion*. Experimental Thermal and Fluid Science 34. p. 1353–1366.
- Santangelo, P. E. & Tartarini, P. (2012). *Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems*. Applied Thermal Engineering 45-46. p. 99 – 107.
- Schick, R. J. Vice President. *Spray Analysis and Research Services Spraying Systems Modeling the Use and Effectiveness of Spray Technology in Gas Conditioning Applications*.
- SFPE. Society of Fire Protection Engineers. (2012). *Water Mist For North America, Webinar*. Mayo 2.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Sung Chan, K., & Hong Sun, R. (2003). *An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure*. Building and Environment 38. p. 1309– 1316.

3M™ Novec™ 1230. (2003). *Fire Protection Fluid*. www.3M.com/novec1230fluid.

Wyllen, V. *Fundamentos de Termodinámica*. Segunda Edición.

Vaari, J. (2001). *A Study of Total Flooding Water Mist Fire Suppression System Performance Using a Transient One-Zone Computer Model*. Fire Technology 37. p. 327–342.

Xiao, Xk., Kuang, Kq., Liang, T.S., Tang, Hd., Liao, Gx. & Yuen, Kkr. (2011). *Study on Flame Expansion Phenomenon in Pool Fire Extinguished by Water Mist*. Procedia Engineering 11. p. 550–559.

Yamada, H., Yoon, G. & Okumiya, M. (2008). *Hiroyasu Okuyama, Study of Cooling System with Water Mist Sprayers: Fundamental Examination of Particle Size Distribution and Cooling Effects*.

Yang, P., Liu, T. & Qin, K. (2010). *Experimental and numerical study on water mist suppression system on room fire*. Building and Environment 45. p. 2309 – 2316.

Yang, L., Zhao, J. & Xu, Z, (2010). *Calculation of fire extinguishment time with water mist in an enclosed room*. Journal of Thermal Science. Vol.19, No.6. p. 561–566.

- Yao, B., Fan, W. & Liao, G. (1999). *Interaction of water mists with a diffusion flame in a confined space*. Fire Safety Journal 33. P. 129-139.
- Yao, B., Cong, J., B. H. Qin, W. & Chowb, K. (2012). *Experimental study of suppressing Poly(methylmethacrylate) fires using water mists*. Fire Safety Journal 47.p. 32–39.
- Yongfeng, Z., Yudong, F., Xin, H., Xiang, J. & Qin, J. (sf). *Experimental Study Of The Interaction Between The Water Mists And PVC Fire*. Anhui Province, China. Vol. 85 (B1) p. 39–44.
- Yuh-Ming Ferng, Cheng-Hong Liu. (2011) *Numerically investigating fire suppression mechanism for the water mist with various droplet sizes through FDS code*. Nuclear Engineering and Design 241 p. 3142 – 3148.
- Yunus, A. & Cengel, J. M. (2006). *Cimbala, Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. Capítulo 15. p. 818-819.
- Zhigang, L. & Kim, A. K. (2000). *A review of water mist fire suppression systems – fundamental studies, KIA OR6*.
- <http://www.axis-co.com/Gabinetedepisoservidores.pdf>.

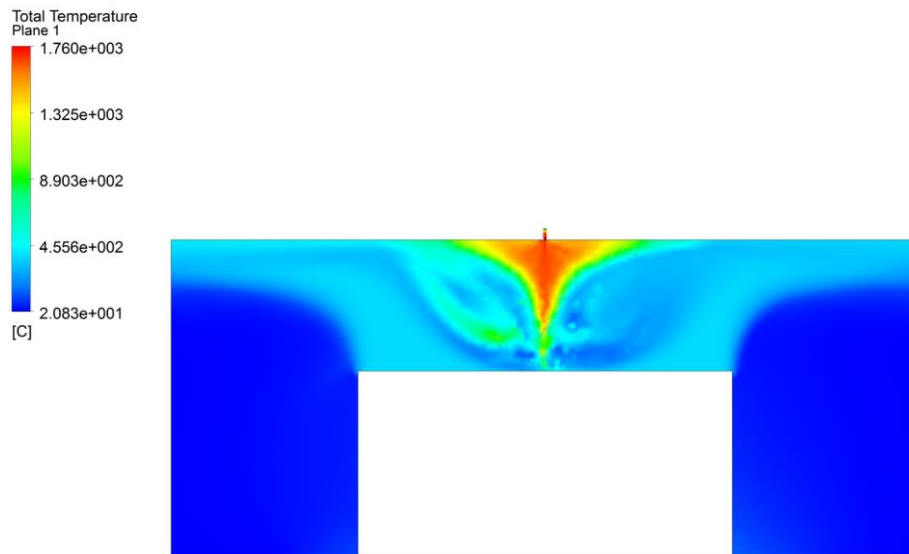
Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Anexos

ANEXO 1 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 203 psi

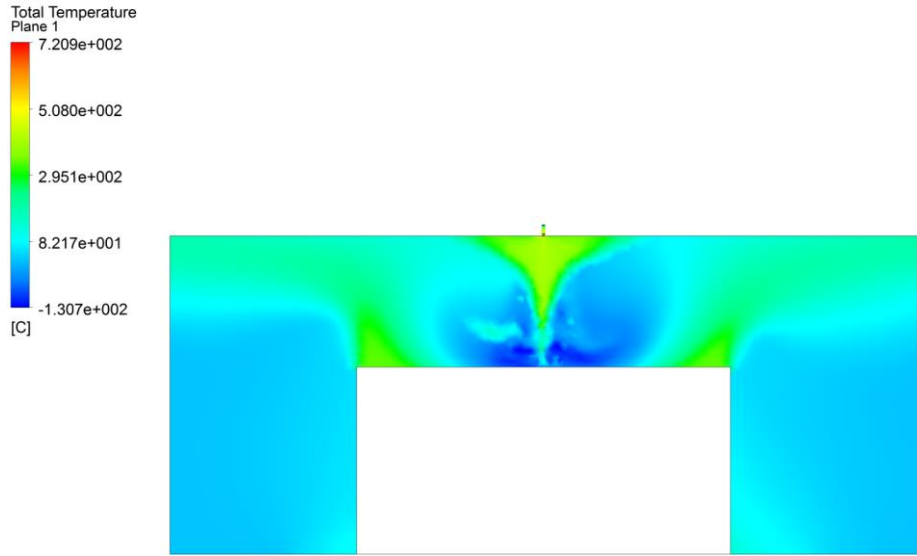
Anexo 1. “Contornos de temperatura para el volumen de control, simulación con presión de 203 psi”

A continuación se presenta el volumen de control con un plano de corte en el centro, de manera que se puede apreciar un “corte” lateral en el centro del volumen de control y se podrá observar la evolución de la simulación cada dos segundos para una presión de 203 psi con los dos criterios de extinción hasta los 20 y hasta los 28 s, que son los tiempos de extinción. Se excluye el $t = 0$ s; se presentó en la Figura 9.

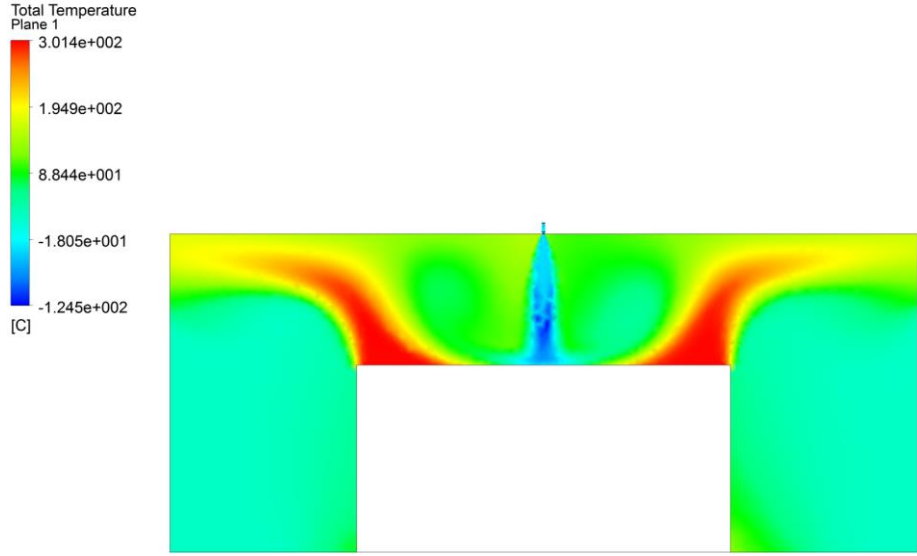


Contornos de temperatura. Para $t = 2$ segundos.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

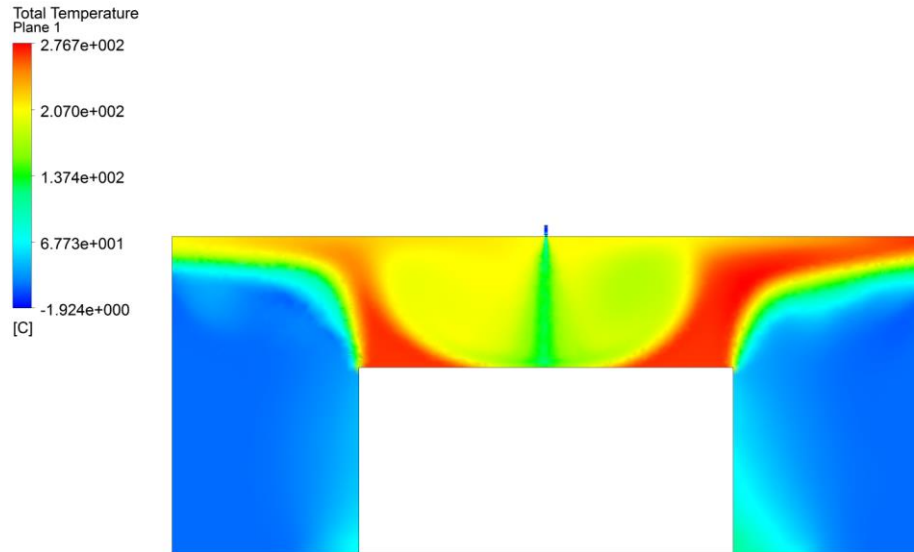


Contornos de temperatura. Para t = 4 s.

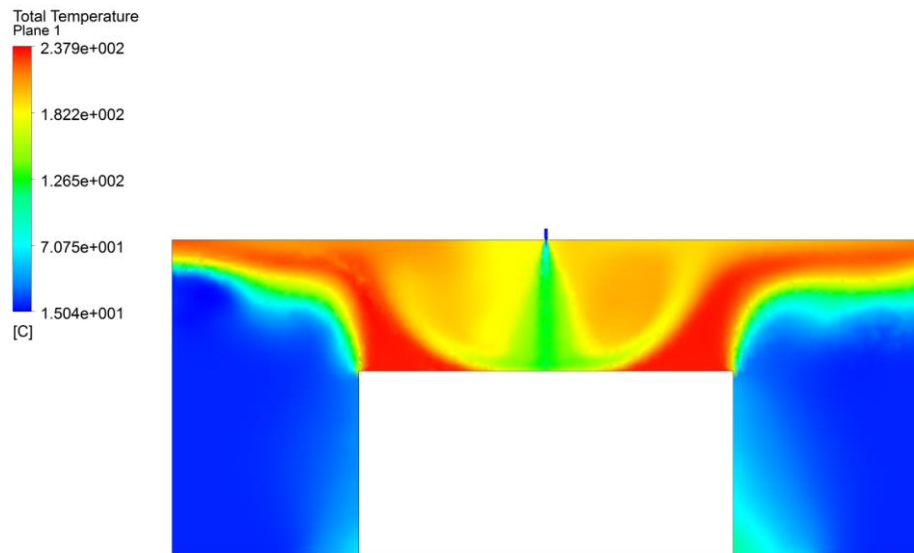


Contornos de temperatura. Para t = 6 s.

ANEXO 1 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 203 psi

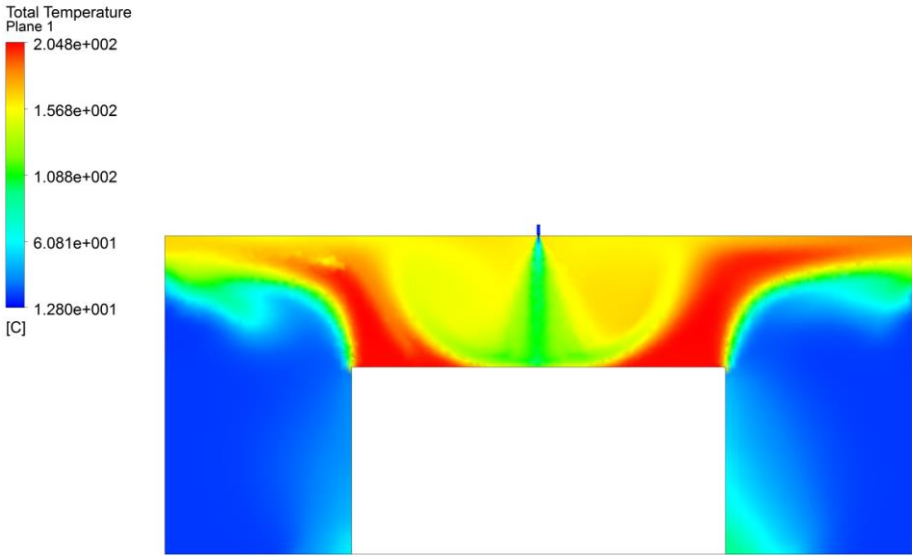


Contornos de temperatura. Para $t = 8$ s.

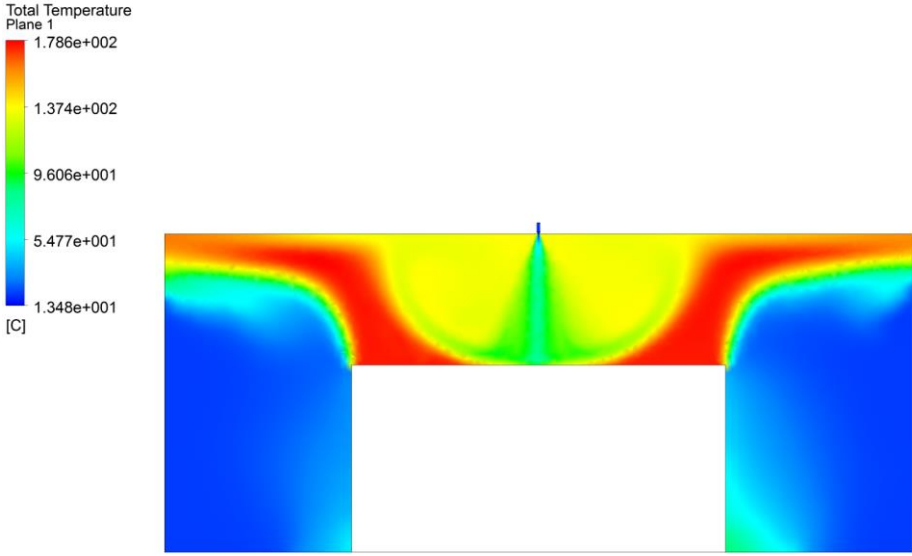


Contornos de temperatura. Para $t = 10$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

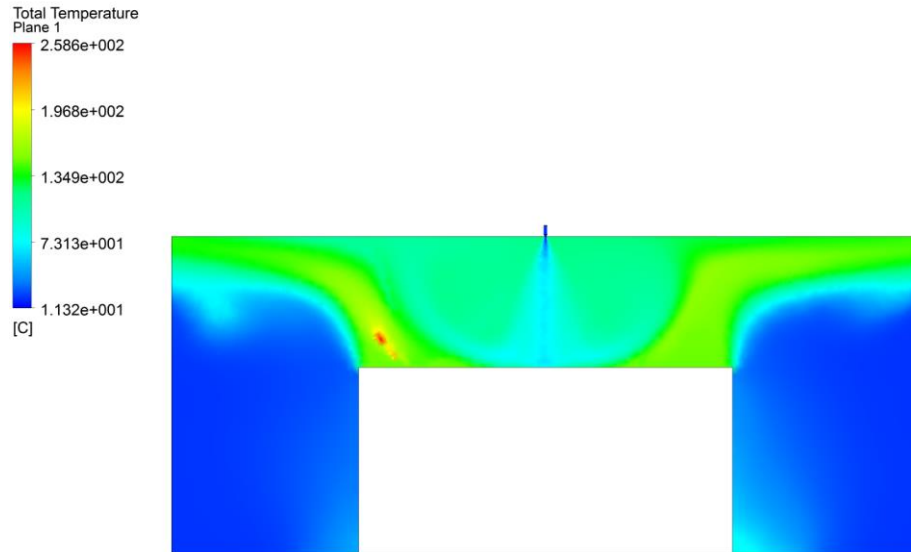


Contornos de temperatura. Para $t = 12$ s.

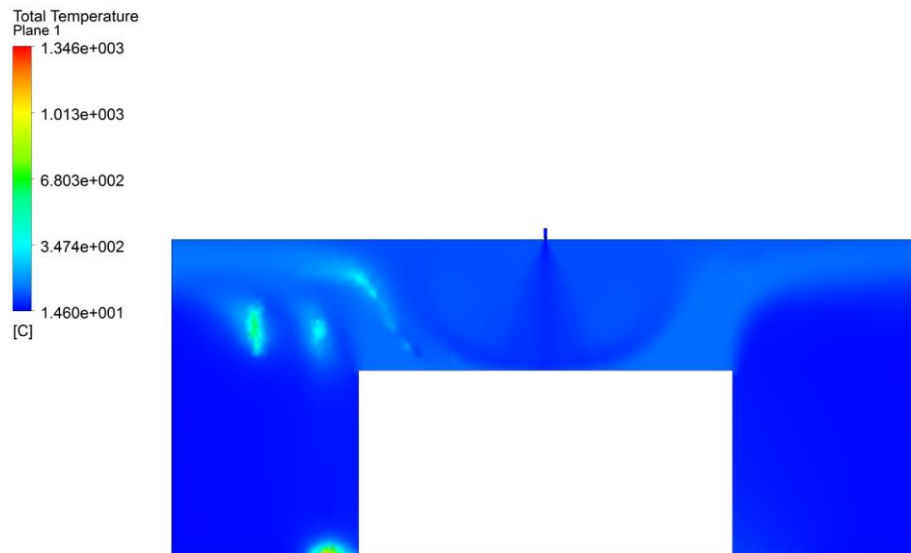


Contornos de temperatura. Para $t = 14$ s.

ANEXO 1 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 203 psi

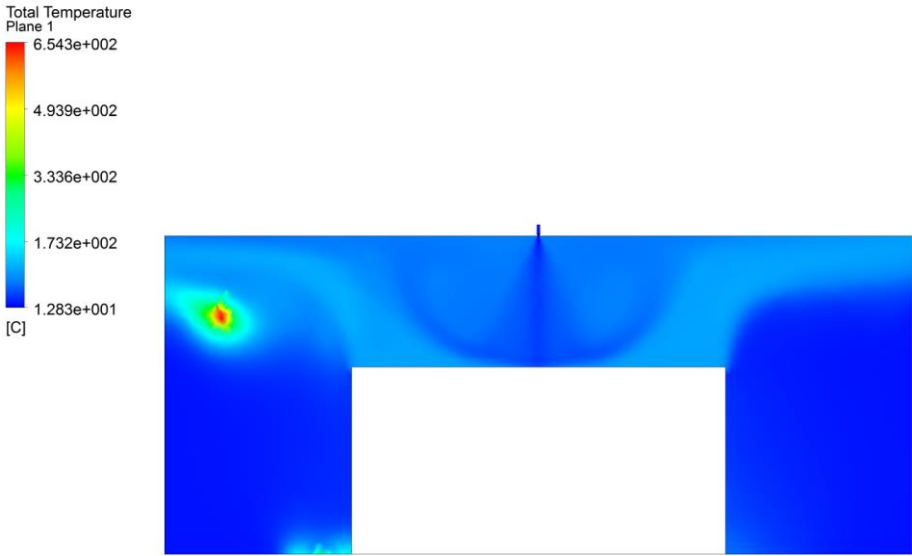


Contornos de temperatura. Para t = 16 s.

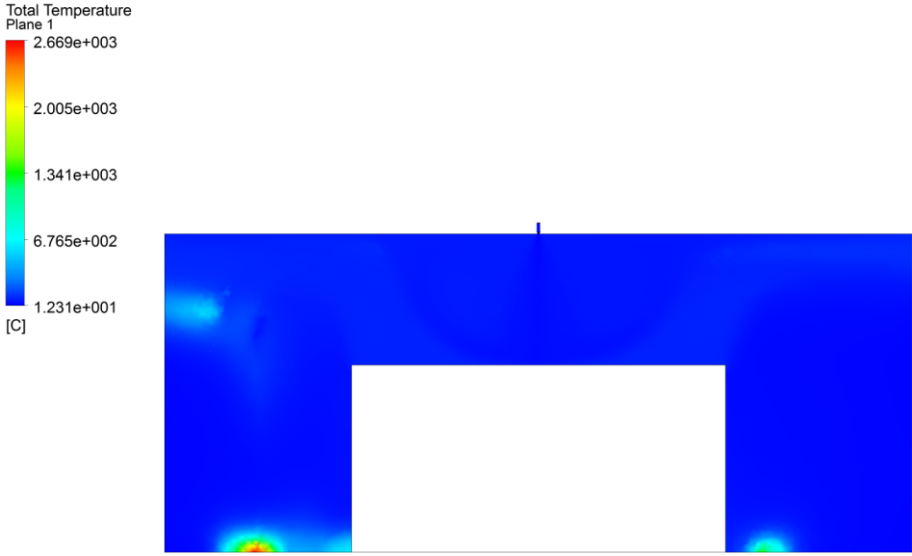


Contornos de temperatura. Para t = 18 s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

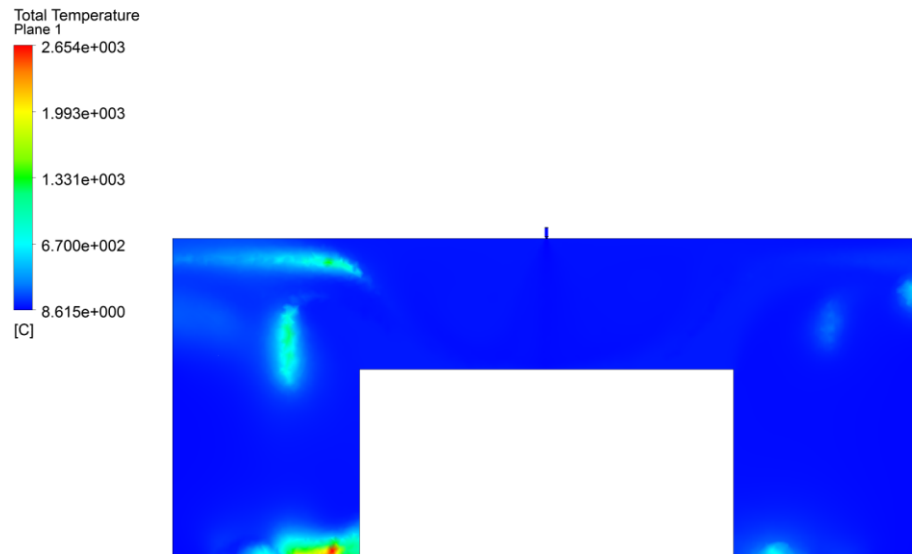


Contornos de temperatura. Para $t = 20$ s.

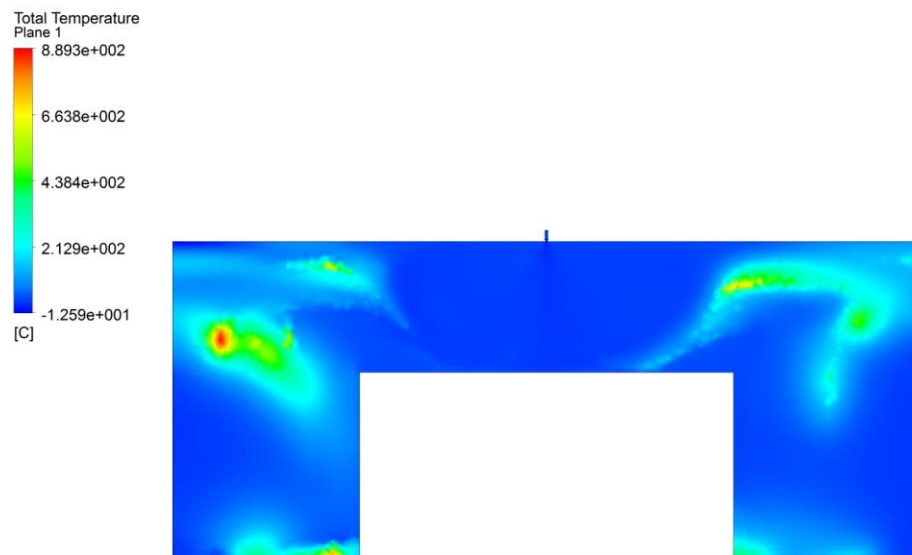


Contornos de temperatura. Para $t = 22$ s.

ANEXO 1 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 203 psi

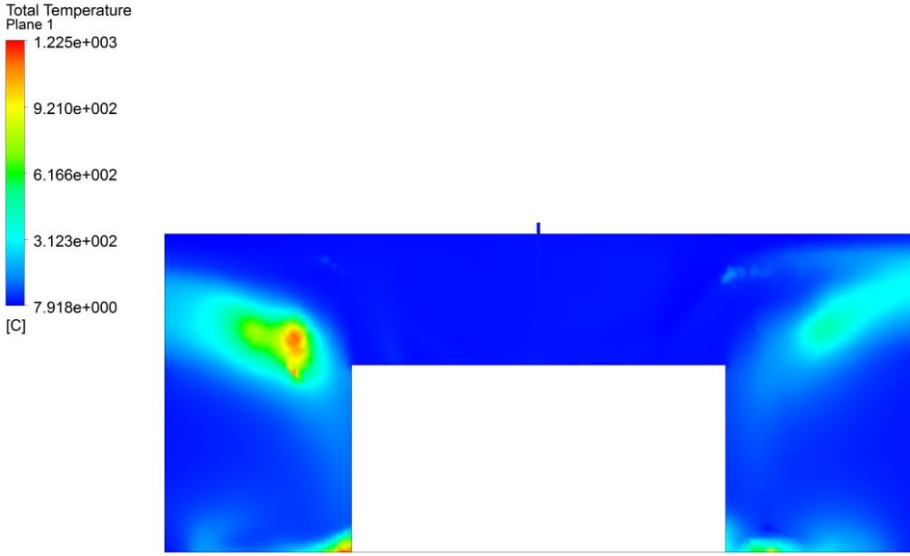


Contornos de temperatura. Para $t = 24$ s.



Contornos de temperatura. Para $t = 26$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

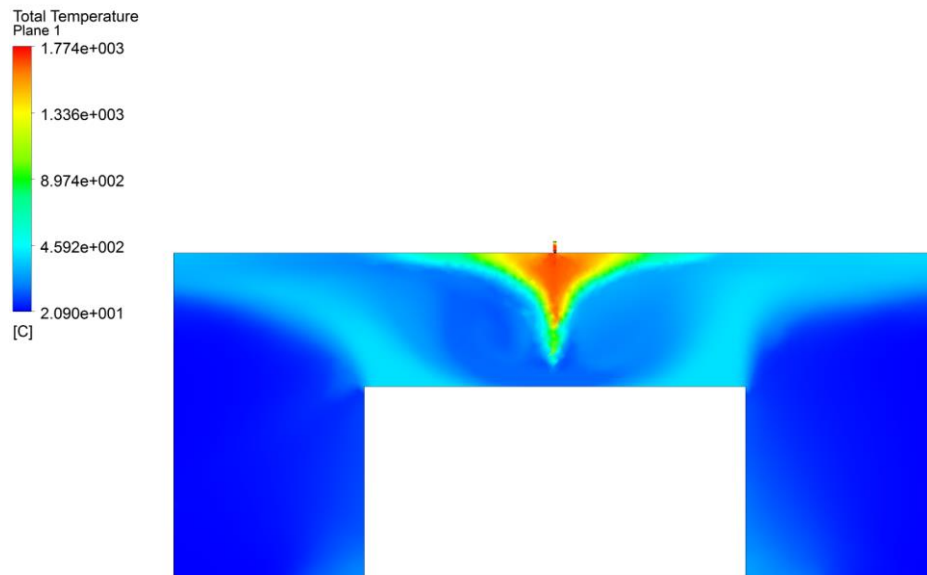


Contornos de temperatura. Para $t = 28$ s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi

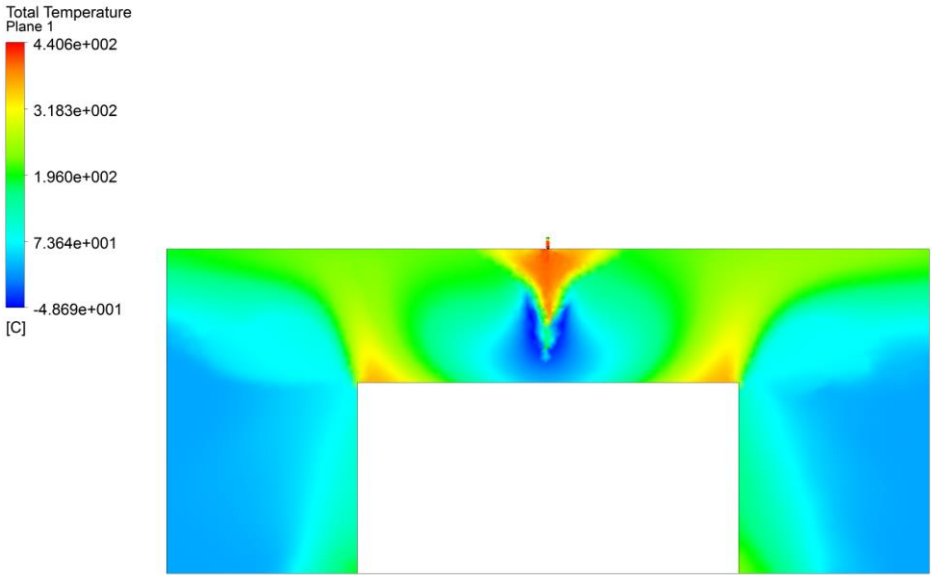
Anexo 2. “Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi”

A continuación se presenta el volumen de control con un plano de corte en el centro, de manera que se puede apreciar un “corte” lateral en el centro del volumen de control y se podrá observar la evolución de la simulación cada dos segundos para una presión de 101 psi con los dos criterios de extinción hasta los 28 y hasta los 40 s, que son los tiempos de extinción. Se excluye el $t = 0$ s; se presentó en la Figura 9.

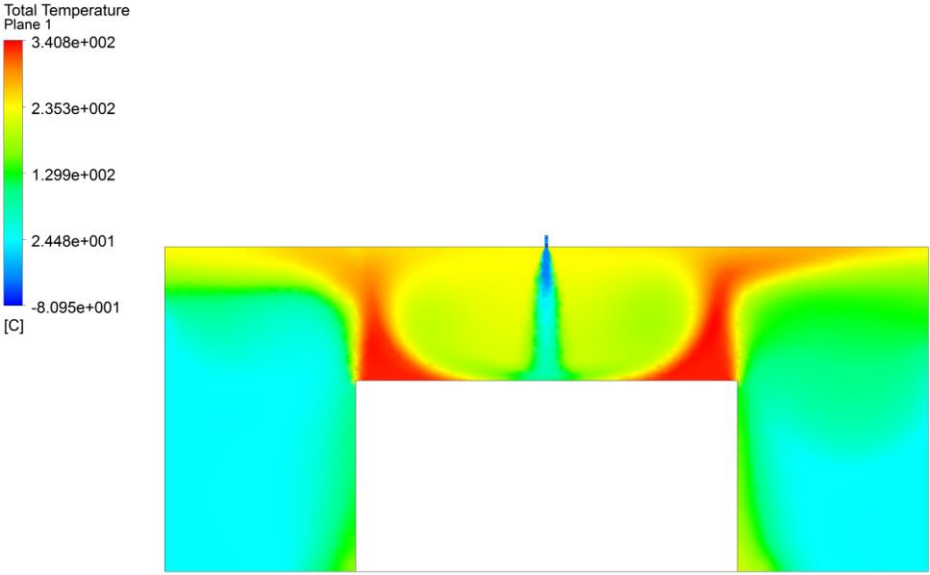


Contornos de temperatura. Para $t = 2$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

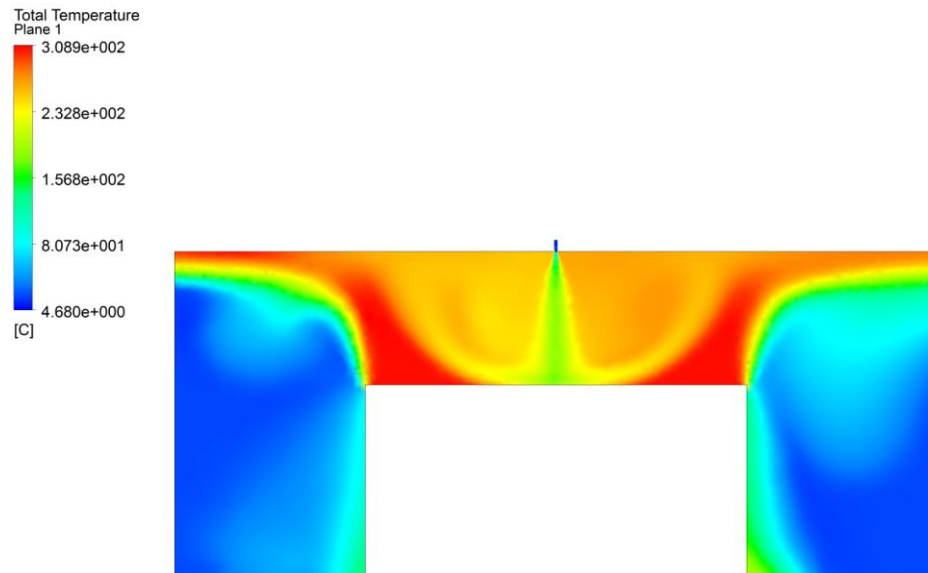


Contornos de temperatura. Para t = 4 s.

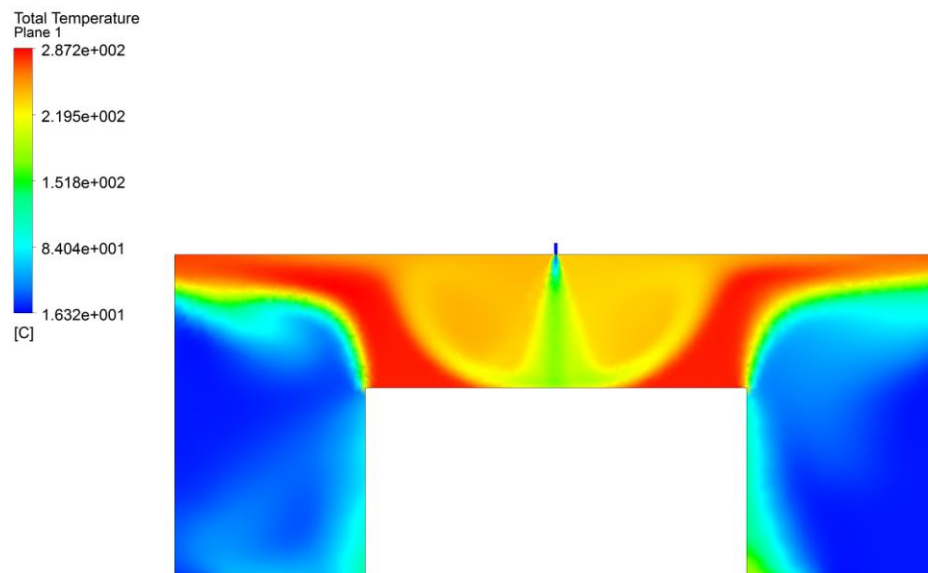


Contornos de temperatura. Para t = 6 s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi

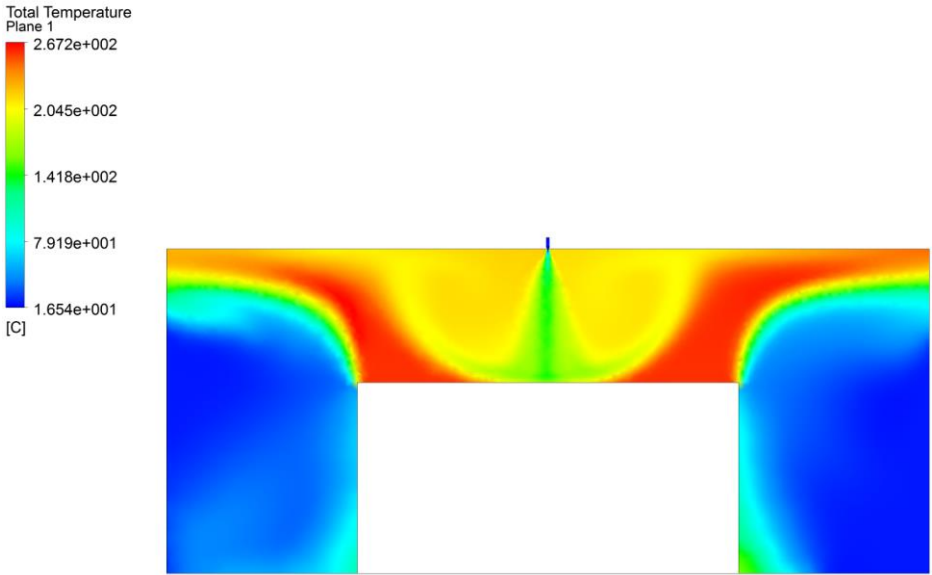


Contornos de temperatura. Para t = 8 s.

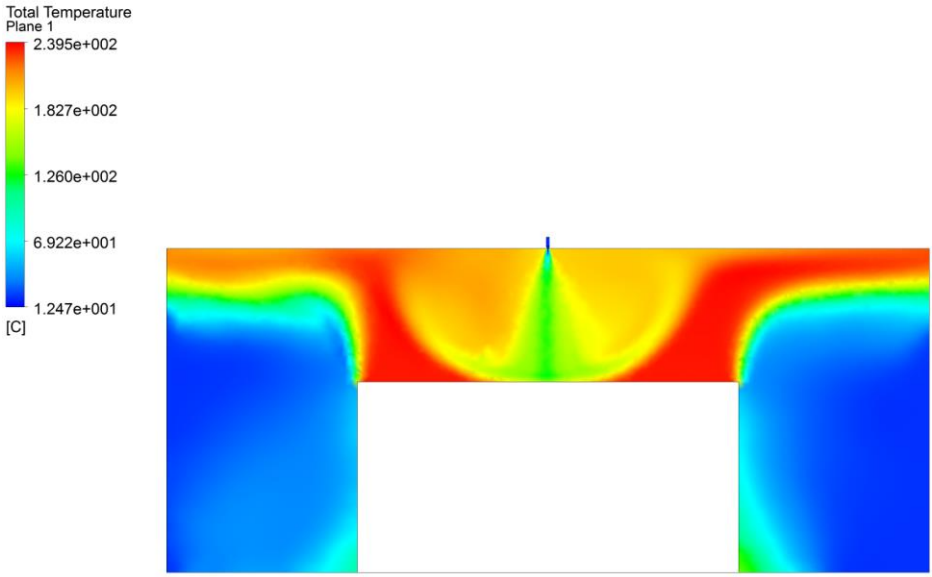


Contornos de temperatura. Para t = 10 s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

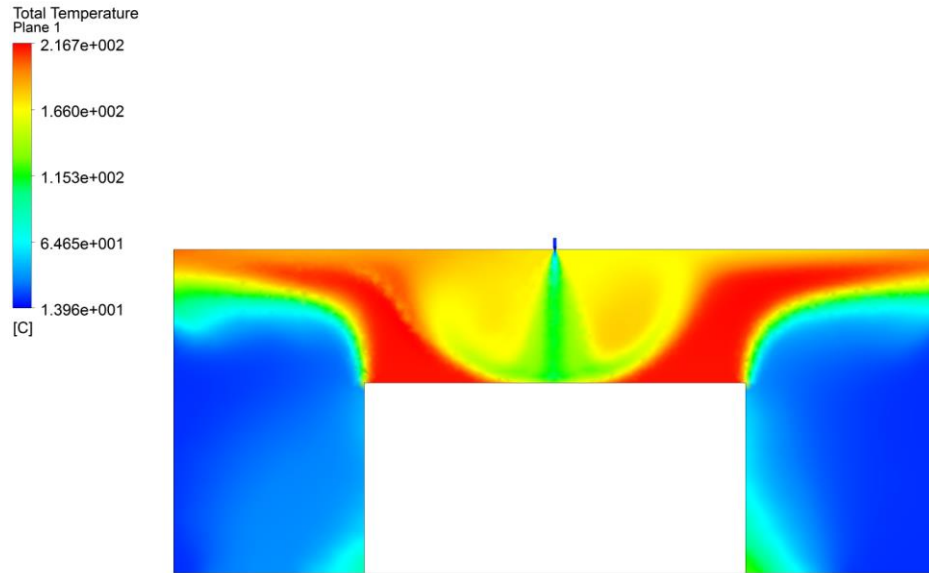


Contornos de temperatura. Para t = 12 s.

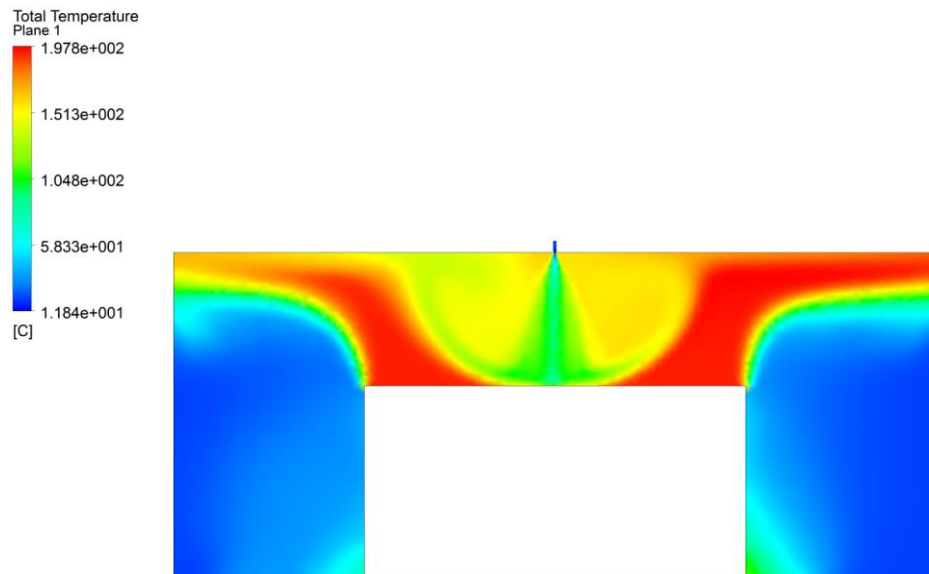


Contornos de temperatura. Para t = 14 s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi

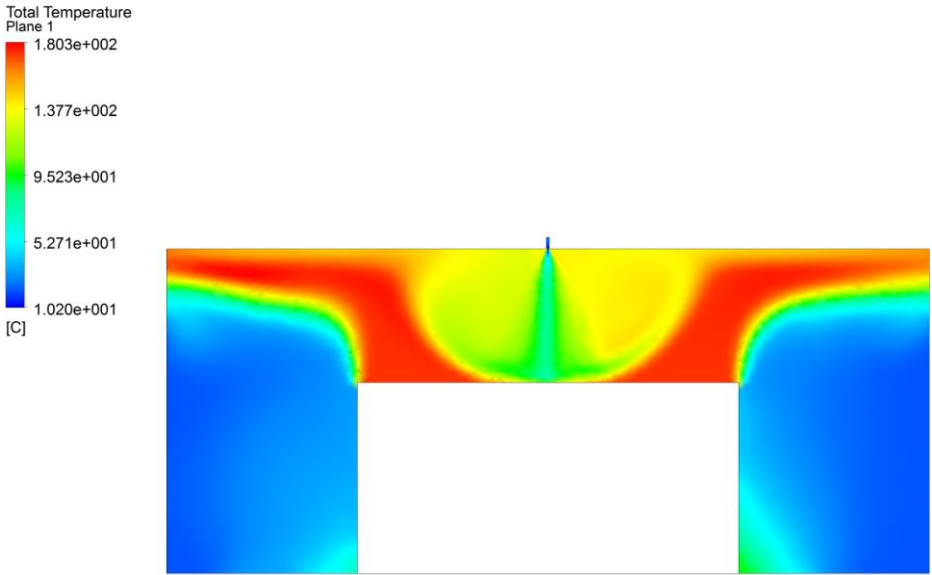


Contornos de temperatura. Para t = 16 s.

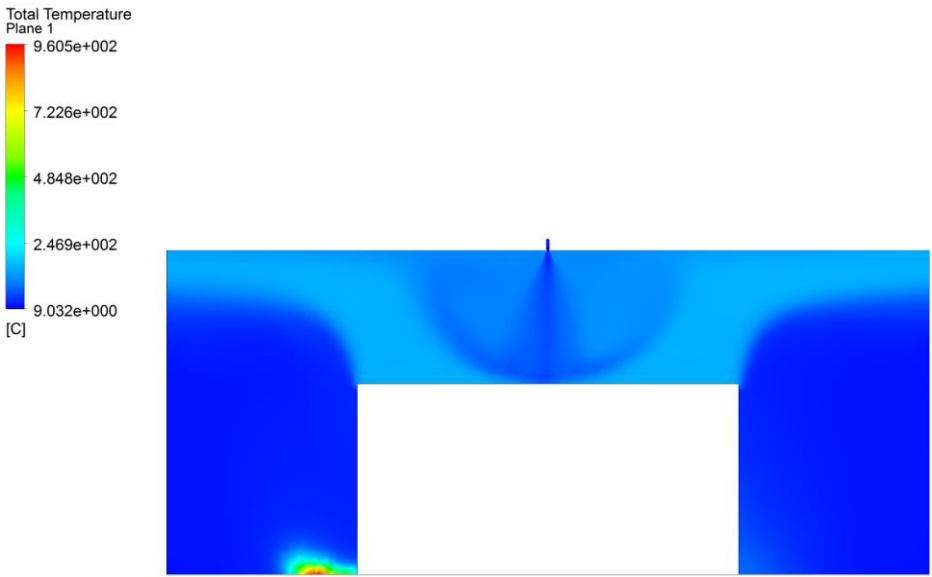


Contornos de temperatura. Para t = 18 s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

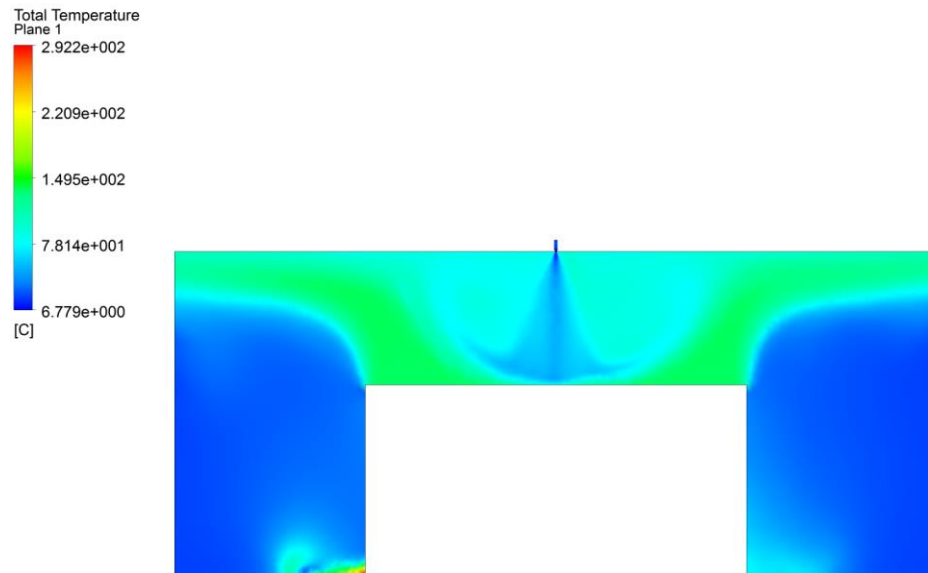


Contornos de temperatura. Para t = 20 s.

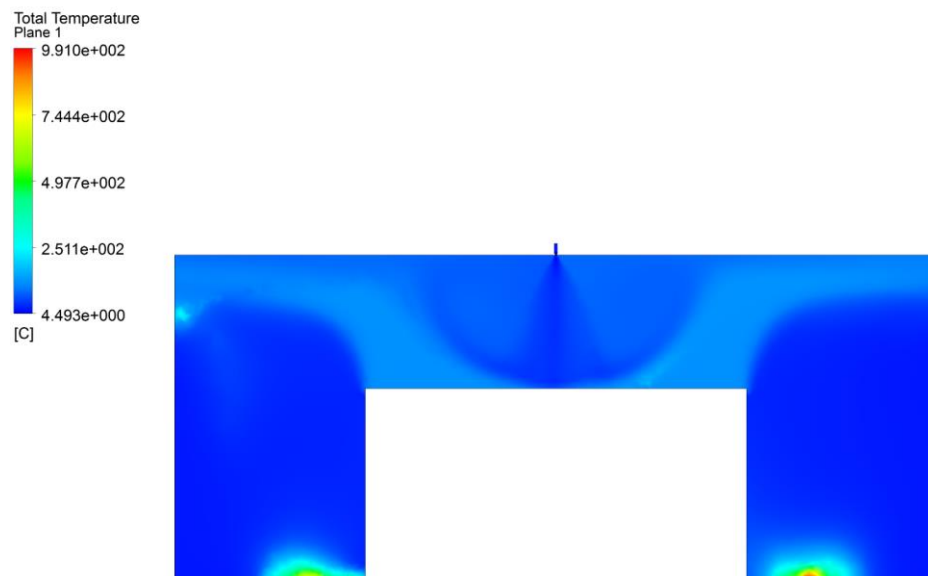


Contornos de temperatura. Para t = 22 s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi

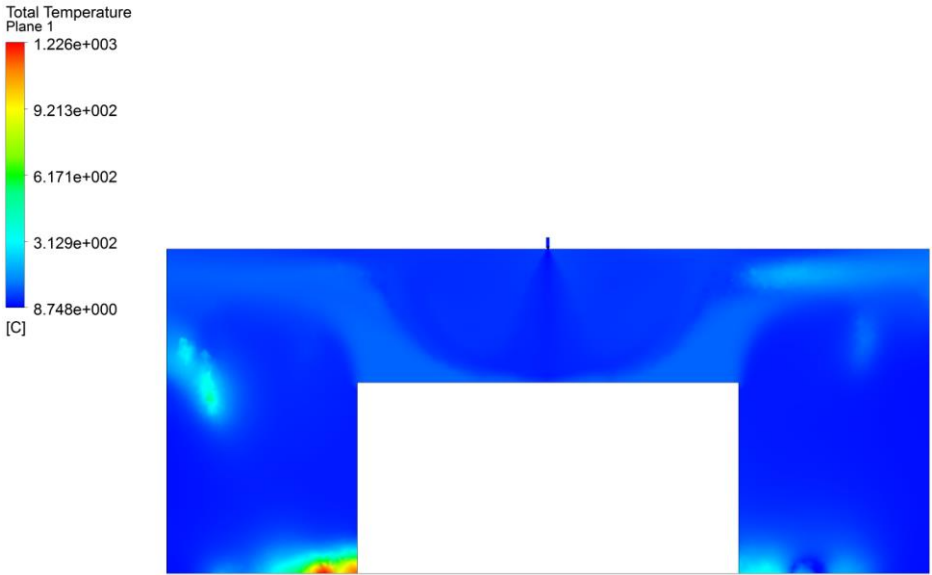


Contornos de temperatura. Para $t = 24$ s.

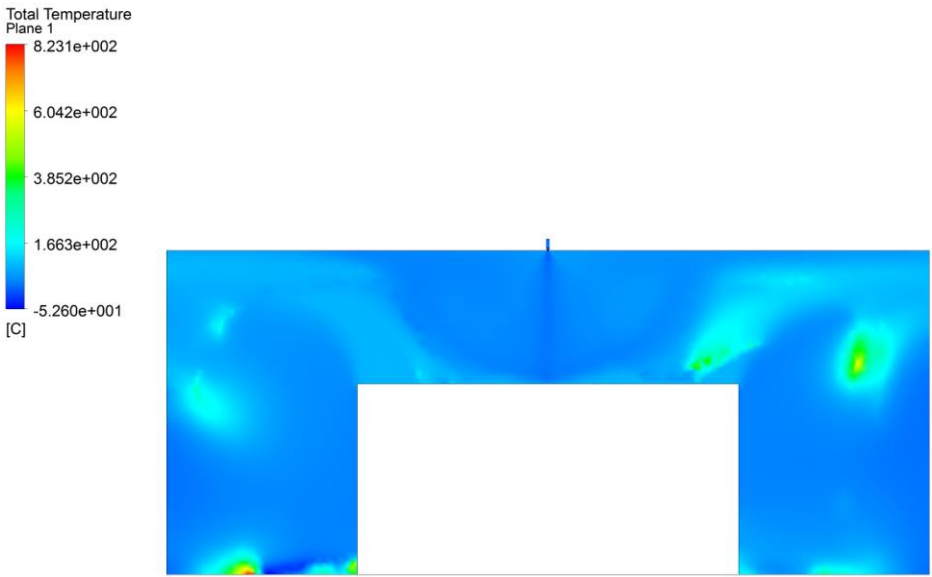


Contornos de temperatura. Para $t = 26$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

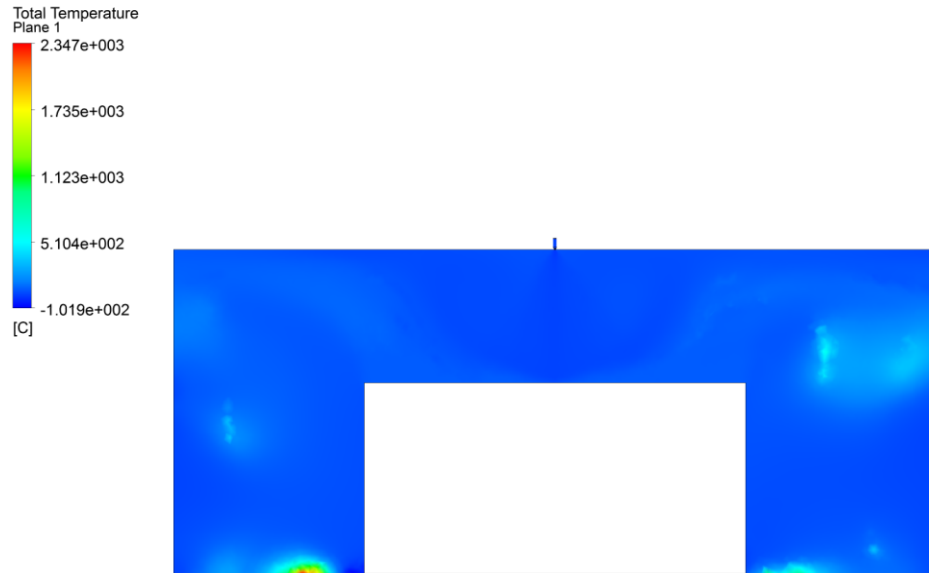


Contornos de temperatura. Para $t = 28$ s.

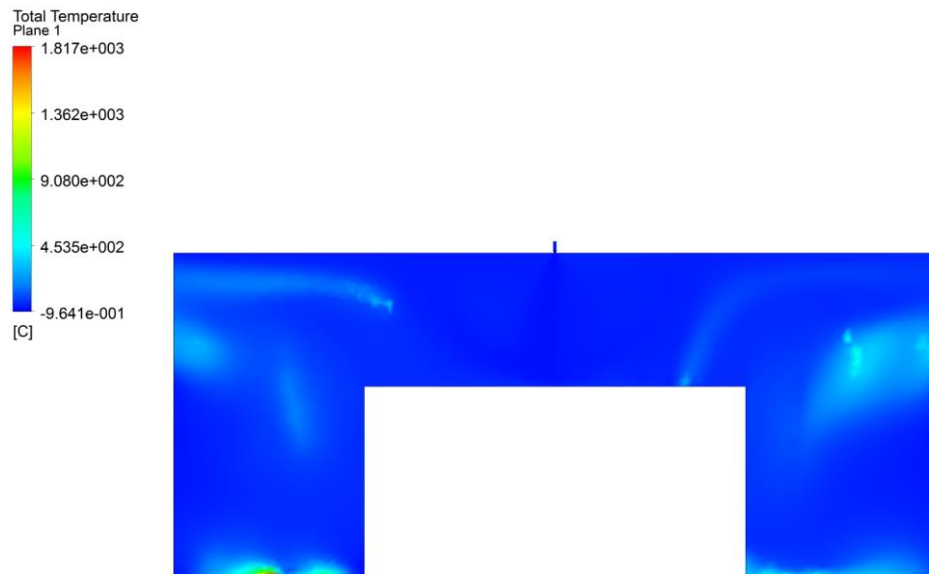


Contornos de temperatura. Para $t = 30$ s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi

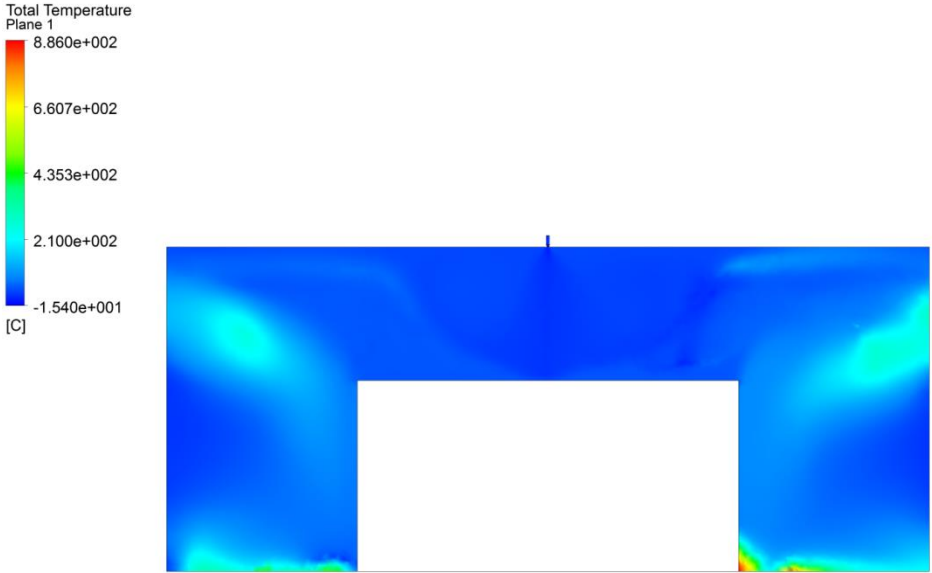


Contornos de temperatura. Para $t = 32$ s.

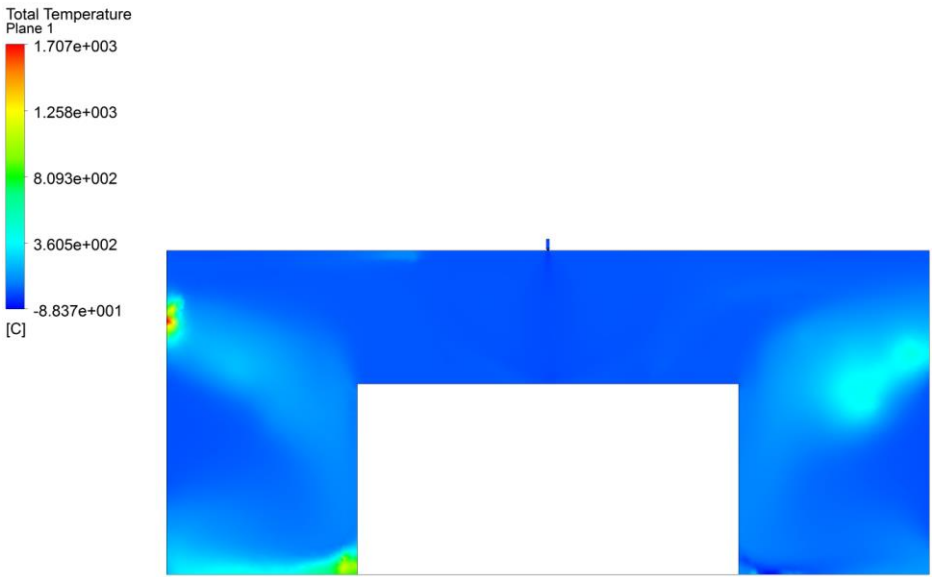


Contornos de temperatura. Para $t = 34$ s.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

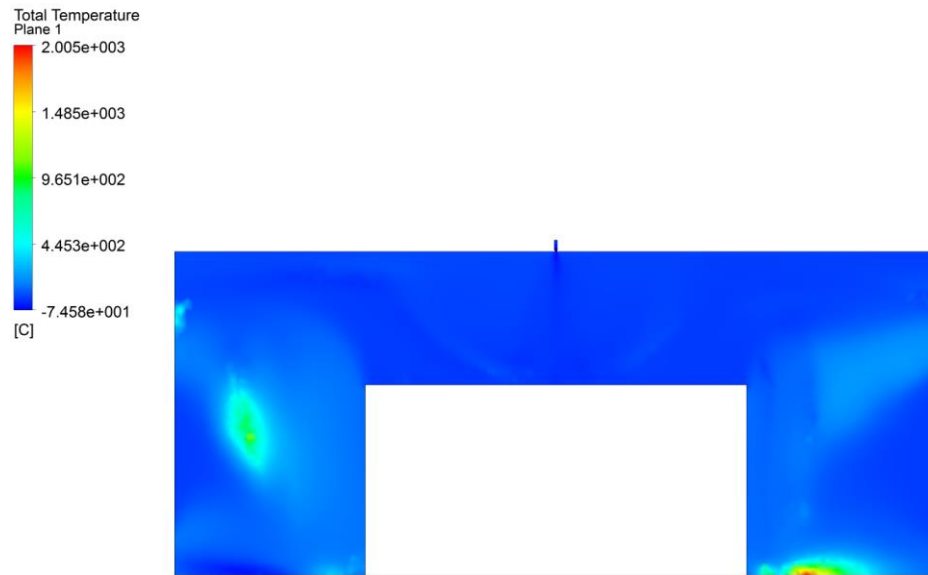


Contornos de temperatura. Para $t = 36$ s.



Contornos de temperatura. Para $t = 38$ s.

ANEXO 2 Contornos de temperatura para el volumen de control simulación con presión de 101 psi



Contornos de temperatura. Para $t = 40$ s.

Anexo 3. "Independencia de malla"

A continuación se muestran los resultados de las variables del volumen de control con mallados de 25 mm y 30 mm, se realizará la comparación con el mallado con que se realizaron las dos simulaciones en el volumen de control de 20 mm y se muestra el análisis de los resultados.

El estudio de independencia de malla se realizó con el fin de encontrar el tamaño de malla computacional límite tal que las predicciones del modelo fueran independientes de cualquier disminución de ésta. El estudio consistió en comparar las predicciones del modelo computacional para diferentes mallas hasta encontrar el tamaño de malla límite. Para realizar el estudio de independencia de malla, se tomaron como variables la temperatura promedio en el paquete combustible y el tiempo transcurrido para que se generará esa temperatura debido a la extinción que estaba siendo producida por el agua nebulizada. Estos resultados fueron tomados de la simulación para 203 psi. Como se mencionó el mallado para la simulación fue de 20 mm y se comparó este mallado con mallados de 25 y 30 mm. Se presenta en la siguiente tabla el contenido de elementos y nodos por cada mallado.

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Dimensiones del mallado	Elementos	Nodos
20 mm	3427283	594306
25 mm	1765311	309108
30mm	1031203	182230

A continuación se exhiben para los tres diferentes mallados las variables de tiempos y temperaturas

Dimensiones del mallado	Temperatura promedio en paquete combustible (°C)	Tiempo (s)
20 mm	353,85	2
	177,85	4
	231,85	6
	244,85	8
	217,85	10
	189,85	12
	163,85	14
	139,85	16
	116,85	18
	94,85	20

ANEXO 3 Independencia de malla

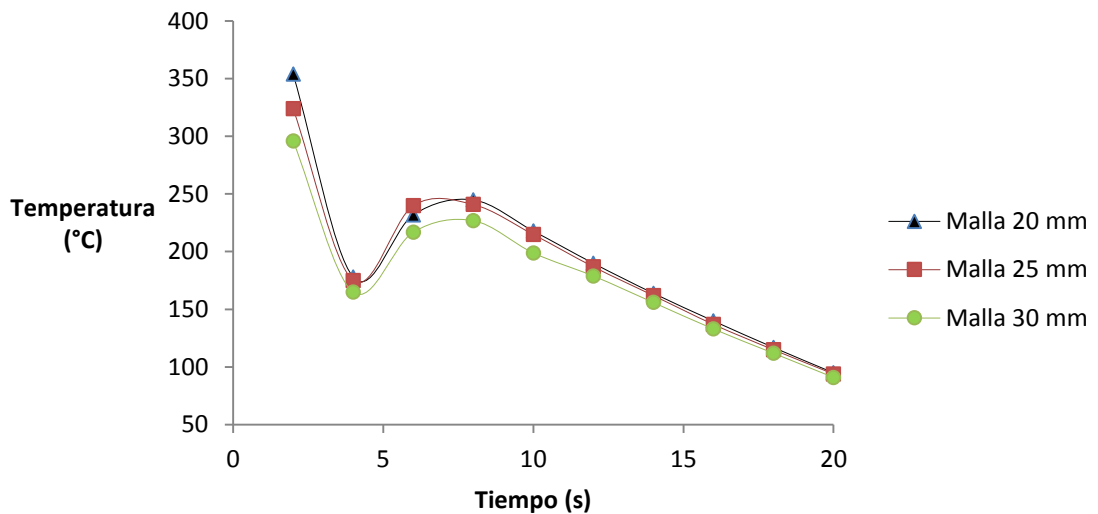
Dimensiones del mallado	Temperatura promedio en paquete combustible (°C)	Tiempo (s)
25 mm	323,85	2
	174,85	4
	239,85	6
	240,85	8
	214,85	10
	186,85	12
	161,85	14
	136,85	16
	114,85	18
	93,85	20

Dimensiones del mallado	Temperatura promedio en paquete combustible (°C)	Tiempo (s)
30 mm	295,85	2
	164,85	4
	216,85	6

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

30 mm	226,85	8
	198,85	10
	178,85	12
	155,85	14
	132,85	16
	111,85	18
	90,85	20

A continuación se muestra la gráfica de temperatura y tiempo para cada una de las mallas.



Se puede apreciar en la Gráfica que la malla de 20 mm y la malla de 25 mm, son las mallas más acertadas, ya que las predicciones de la simulación son muy similares en

ANEXO 3 Independencia de malla

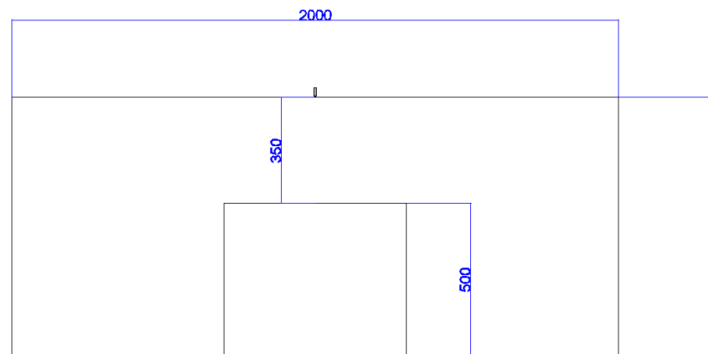
Ambos casos; en el caso de la malla de 30 mm se puede apreciar que la solución aunque es también muy similar a la de 20 y 25 mm, sufre grandes divergencias respecto a estas, sobre todo entre los cinco y los 13 segundos.

La malla de 20 mm, fue seleccionada, ya que fue la malla más densa con que se pudo trabajar y según los resultados de las simulaciones realizadas, esta no presentaba diferencias significativas con la malla de 25 mm.

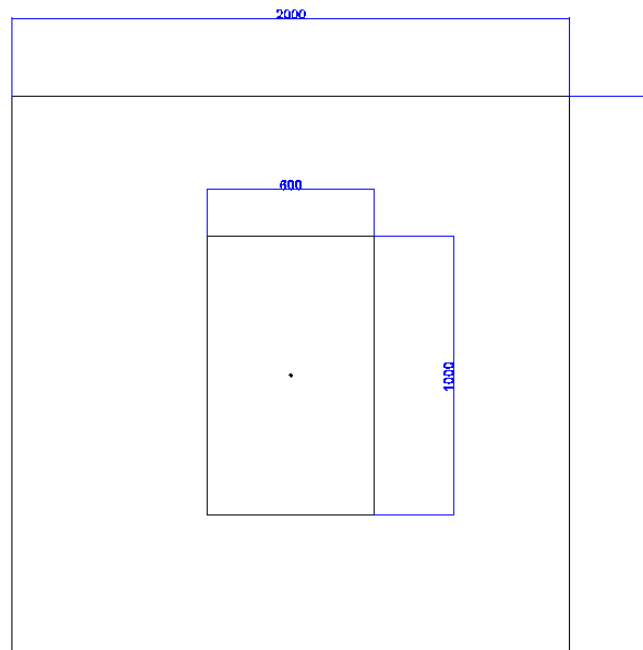
ANEXO 4 Dimensiones del volumen de control

Anexo 4. "Dimensiones del volumen de control"

A continuación se exhiben las dimensiones del volumen de control, las dimensiones se dan en milímetros. La siguiente figura muestra una vista lateral del volumen de control



La siguiente Figura muestra la vista de planta del volumen de control



ANEXO 5 Características de la boquilla de descarga

Anexo 5. "Boquilla de descarga"

A continuación se presenta una imagen y las características de la boquilla de descarga marca GW:



Especificaciones técnicas

Factor K	2 (Métrico)
Angulo de aspersión	60°
Materiales de la boquilla	Acero inoxidable 316, Bronce
Materiales del filtro	Acero inoxidable
Materiales del tapón	Acero inoxidable 304
Peso	77 gramos
Rosca	1/2"
Presión de trabajo	3.5- 16 bares
Agentes extintores	Agua dulce, agua de mar o espuma mejorada con agua.

ANEXO 6 Configuración de las simulaciones

Anexo 6. "Configuración de las simulaciones"

A continuación se exhibe la configuración de la simulación en estado transitorio de 203 psi

Dominio – Ajustes Básicos	
<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Tipo de dominio	Dominio de fluido
Mezcla de gas	Material de la librería
Morfología	Fluido continuo
Presión de referencia	11,5 psi
Modelo de flotabilidad	Flotante
Gravedad	-9,81 m/s ²
Referencia de densidad de flotabilidad	1,2 kg/m ³
Movimiento del dominio	Estacionario
Deformación de malla	Ninguna
Dominio – Modelos de Fluido	
Transferencia de calor	Fluido dependiente
Modelo de turbulencia	k - Épsilon

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Combustión	Ninguna
Radiación térmica	Ninguna
Dominio – Modelos Específicos de Fluido	
Fluido	Mezcla de gas – H2O1
Mezcla de gas – modelo de transferencia de calor	Energía térmica
Modelo de flotabilidad del fluido	No flotante
Componente	Aire gas ideal – H2O
Dominio – Modelos de Fluidos Semejantes	
Fluidos semejantes	Mezcla de gas – H2O1
Acoplamiento de partículas	Completamente acopladas
Modelo de fuerza de arrastre	Schiller Naumann
Opción de transferencia de calor	Ranz Marshall
Detalles de componentes semejantes	Aire gas ideal – H2O1 / H2O – H2O1
Aire gas ideal – H2O1	Modelo de evaporación de liquido
H2O – H2O1	Modelo de evaporación de liquido
Condición de frontera Entrada aire – Detalles de frontera	
Régimen del flujo	Subsónico
Velocidad Normal	1,67 m/s

ANEXO 6 Configuración de las simulaciones

Transferencia de calor - temperatura	415 °C
Condición de frontera Entrada agua – Detalles de frontera	
Régimen del Flujo	Subsónico
Presión	203 psi
Dirección de flujo	Normal a la condición de frontera
Temperatura	18 °C
Condición de frontera Entrada agua – Valores de fluido	
Posición de la partícula	Inyección uniforme
Flujo Másico	0,1198 kg/s
Distribución de diámetro de partícula	90, 110, 130, 150, 180, 210, 230, 260, 290, 320
Fracción de masa	10 X 0,1
Temperatura	18 °C
Condición de frontera Aberturas – Detalles de Frontera	
Presión relativa	11,5 psi
Temperatura de la abertura	21 °C
Controlador del Solucionador – Ajustes Básicos	
Esquema de adveccion	Alta resolución
Esquema transitorio	Euler de segundo orden hacia atrás
Control de convergencia	Coficiente mínimo 1 Coficiente máximo 4

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional

Criterio de convergencia	De tipo residual RMS
	Objetivo residual 1.0 E-4

Tipo de Análisis – Estado Transitorio

Tiempo de duración (total)	30 s
Pasos de tiempo	30* 1s
Tiempo inicial	0 s

A continuación se exhibe la configuración de la simulación en estado transitorio de 101 psi. Ya que la mayor parte de los datos son iguales a la simulación para 203 psi; se registran solo los datos que cambian en esta simulación.

Condición de frontera Entrada agua – Detalles de frontera

Presión	101 psi
---------	---------

Condición de frontera Entrada agua – Valores de fluido

Flujo Másico	0,08470 kg/s
Distribución de diámetro de partícula	130, 150, 170, 190, 210, 230, 250, 270, 290, 310

ANEXO 6 Configuración de las simulaciones

Tipo de Análisis – Estado Transitorio

Tiempo de duración (total)	45 s
Pasos de tiempo	45* 1s
Tiempo inicial	0 s

ANEXO 7 Evidencia Representante ANSYS Brasil

Anexo 7. "Evidencia Representante ANSYS Brasil"

Customer Portal Login Details Recibidos x

Juan Sebastian Tello Cano <suporte@esss.com.br> 30/8/13 ☆ para mí


portugués > español Traducir mensaje Desactivar para: portugués x

Prezado(a) Arturo Arce,
O acesso ao ESSS Customer Portal foi habilitado com sucesso. Clique [aqui](#) para ler o manual em Português de uso do portal.
Para o acesso ao Portal, utilize os dados abaixo:
<https://www.esss.com.br/customerportal/>
Usuário : arturo.arce74@gmail.com Senha: qoch4vzi

Obrigado pela atenção.
Atenciosamente, ESSS

Cordial saludo Señor(a) Arturo Arce
El Acceso al ESSS Customer Portal fue habilitado satisfactoriamente. Favor Ingresar [aqui](#) para leer el manual en Español del uso del Portal
Para acceder al Portal, utilice los siguientes datos:
<https://www.esss.com.br/customerportal/>
Usuário : arturo.arce74@gmail.com Clave: qoch4vzi

Gracias por su atención.



[Ticket ID : TT1359] Simulacion extincion de incendio Recibidos x

suporte@esss.com.br 3/9/13 ☆ para mí

inglés > español Traducir mensaje Desactivar para: inglés x

Dear arturo.arce74@gmail.com
Thank you for using the ESSS Customer Portal.

This is confirmation that your request regarding to "Simulacion extincion de incendio " has been received on 03/09/2013 15:34.
A member of the team is going to be notified and will be in contact with you.
Best Regards,
ESSS Customer Portal

Haz clic aquí si quieres [Responder](#), [Responder a todos](#) o [Reenviar](#) el mensaje

3,9 GB (26%) ocupados de 15 GB [Administrar](#) [Condiciones](#) - [Privacidad](#) Última actividad de la cuenta: hace 1 hora [Información detallada](#)

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional



Arturo Arce
May 25, 17:13

Ana: Regards, Files do not loaded by FTP, could send you files by this email.

Thanking your prompt answer

Cordialmente,

Arturo Arce

Ing. Mecanico

Bogota D.C. - Colombia

Móvil: 314-328-82-62

E-Mail: arturo.arce74@gmail.com

Regards, **ESSS** Support Team



Germano Gavarrão de Freitas (Customer Service)
May 26, 11:59

This request was closed and merged into request [#2260](#) "CFX".



Arturo Arce
May 25, 17:13



Regards, **ESSS** Support Team

This email is a service from Customer Service. Delivered by [Zendesk](#).



Arturo Arce
May 29, 17:41

Ana: regards

I would like to know if you received files in dropbox.

Thanking your answer

Regards, **ESSS** Support Team

This email is a service from Customer Service. Delivered by [Zendesk](#).

ANEXO 7 Evidencia Representante ANSYS Brasil



Ana Paula Faria (Customer Service)

Jun 1, 10:50

Hello Arturo,

I'm downloading your file. As soon I finish the download, I'll verify your setup.

Regards,

Ana Paula Faria

ESSS Support Team

[ESSS 2015 Training Agenda](#)



arturo arce <arturoarce74@gmail.com>

para ESSS ▾

4 jun. ☆



Ana: regards, did you received my mail?.

Thanks

Cordialmente,

Arturo Arce

Ing. Mecanico

Bogota D.C. - Colombia

Móvil: 314-328-82-62

E-Mail: arturo.arce74@gmail.com

Investigación numérica de la termodinámica de extinción de fuego mediante agua nebulizada en un centro de cómputo, empleando la dinámica de fluidos computacional



Ana Paula Faria (Customer Service)

Jun 10, 16:18

Hello Arturo,

I'm sorry, I was traveling in the past few days, that's why I didn't answer you. If you wish, you can write in spanish, I can read spanish.

Talking about the pressure, in the setup of the domain you need to specify the "reference pressure" (that you set the value 11.5psi), so when the boundary condition requires the "relative pressure", this is the gauge pressure, the "reference pressure" is taken to account it. In other words, you need to specify a reference pressure (p_{ref}) and in the boundary condition the relative pressure (p_{rel}), so the total pressure (p_{total}) in this region is:

$$p_{total} = p_{ref} + p_{rel}$$

So, if you want, for example, that the outlet pressure be 1atm, and you put in reference pressure 1atm, you have:

$$p_{total} = 1 \text{ atm (the value you want in boundary condition)}$$

$$p_{ref} = 1 \text{ atm (the value you set in "reference pressure")}$$

$$p_{rel} = p_{total} - p_{ref} \text{ (} p_{rel} \text{ is the pressure required in your boundary condition)}$$

$$p_{rel} = 1 \text{ atm} - 1 \text{ atm}$$

So, the value you need to set in outlet boundary is 0 atm.

About the initialization temperature, I would recommend that you set a value near the value expected for the problem results. If I understand your question, you want to know if you can set an initial temperature in a simulation that is initialized with the results of a previous simulation? In this case I recommend that you initialize your first case with a good guess of temperature.

I would like to ask you to change this configuration as I propose to see if the temperature problem will be corrected.


Regards,

Ana Paula Faria

ESSS Support Team

[ESSS 2015 Training Agenda](#)

ANEXO 7 Evidencia Representante ANSYS Brasil

 **arturo arce** <arturoarce74@gmail.com> 2 jul. ☆  
para ESSS ▾

Hello Ana; i could not answer you; i was traveling, i did changes you had send me but the results are the same. My problem is unsolved.

Regards

 **Ana Paula Faria** (Customer Service)
Aug 24, 14:31

Hello Arturo,

May I close your support request?

 **arturo arce** <arturoarce74@gmail.com> 25 ago. ☆  
para ESSS ▾

hello Ana my problem was unsolved, cause temperatures through it all transient time, show negative temperatures and although I made changes that were counseled, results are the same.

degree work will be sustained that in multiphase flows convergence is very difficult to achieve.

--
